



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Hindrek Hirschon

**KONSTRUKTIIVSETEST
SOOJUSISOLATSIOONIPANEELIDEST (SIP-PANEELID)
VÄIKEELAMU PIIRDETARINDITE SOOJUSTEHNILINE
ANALÜÜS JA TULEMUSTE VÕRDLUS
PUITKARKASSHOONEGA**

THERMAL ANALYSIS OF THE RESIDENTIAL ENVELOPE
BUILT WITH STRUCTURAL INSULATED PANELS (SIPs)
AND COMPARISON OF RESULTS TO THE STICK FRAME
CONSTRUCTION

Magistritöö
Maaehituse erialal

Juhendaja: nooremteadur Martti-Jaan Miljan, MSc

Tartu 2018

| | | | |
|--|---------------|-----------------------------------|------------|
| Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Magistritöö lühikokkuvõte | |
| Autor: Hindrek Hirschon | | Õppekava: maaehitus | |
| Pealkiri: Konstruktiivsetest soojusisolatsioonipaneelidest (SIP-paneelid) väikeelamu piirdetarindite soojustehniline analüüs ja tulemuste võrdlus puitkarkasshoonega. | | | |
| Lk.: 118 | Jooniseid: 40 | Tabeleid: 39 | Lisasid: 5 |
| Osakond: | | Metsandus- ja maaehitus instituut | |
| Uurimisvaldkond: | | Puitkonstruktsioonid | |
| Juhendaja(d): | | Martti-Jaan Miljan | |
| Kaitsmiskoht ja aasta: | | Tartu 2018 | |
| <p>Eesmärgiga vähendada hoonete energiakasutust peavad Euroopa Liidu hoonete energiatõhususe direktiivi kohaselt kõikide liikmesriikide uusehitised pärast 31. detsembrit 2020 vastama liginullenergiahoonete kriteeriumitele (avalikud hooned pärast 31. detsembrit 2018). Karmistuvate nõuete valguses suureneb ühe enam vajadus uute energiatõhusate ehitusmaterjalide ja -tehnoloogiate järele.</p> <p>Lõputöö eesmärgiks oli uurida konstruktiivsete soojusisolatsioonipaneelidega (SIP-paneelid) ehitatud väikeelamu piirdetarindite soojustehnilisi omadusi ja võrrelda neid puitkarkasshoone omadega ning kehtivate energiatõhususe miinimumnõuetega.</p> <p>Energiaarvutuste teostamiseks ja tulemuste võrdlemiseks koostati võrdlushoone arhitektuurne projekt koos põhilisemate sõlmelahendustega ning lahendati see kahes erinevas variandis: SIP-paneelidega ja puitkarkassiga. Kehtivate standardite ja arvutusvälja programmi Therm abil arvutati mõlema hoone piirdetarindite ja liitekohtade soojusläbivused.</p> <p>Arvutustulemuste järgi oli mõlema konstruktsioonitüübi välispiirete summaarne soojuserikadu jagunenud samas proportsioonis välispiirete ja välispiirete liitekohtade vahel (vastavalt 83% ja 17% summaarsest soojuserikadest). Saadud tulemuste järgi oli SIP-hoone välispiirete summaarne soojuskadu 7,5% madalam kui puitkarkasshoonel. Saadud 7,5% erinevus ei ole Eesti ehitusturul piisav argument otsustamiseks SIP-paneelide kasuks. Teoreetiliste arvutuste põhjal SIP-paneelidel suuri eeliseid puitkarkasshoone ees välja ei joonistu. SIP-paneelide õhupidavus omaduste uurimine katsemaja baasil võib tuua välja selle materjali potentsiaali.</p> | | | |
| Märksõnad: konstruktiivne soojusisolatsioonipaneel, SIP-paneel, puitkarkasshoone, soojusläbivus, joonsoojusläbivus, temperatuurivälja arvutus, Therm. | | | |

| | | | | | |
|---|--|-------------|------------------------------|---------------|--|
| Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | | Abstract of Master's Thesis | | |
| Author: Hindrek Hirschon | | | Specialty: Civil engineering | | |
| Title: Thermal analysis of the residential envelope built with Structural Insulated Panels (SIPs) and comparison of results to the Stick Frame Construction. | | | | | |
| Pages: 118 | | Figures: 40 | | Tables: 39 | |
| | | | | Appendixes: 5 | |
| Department: | | | Department of Rural Building | | |
| Field of research: | | | Timber Construction | | |
| Supervisor(s): | | | Martti-Jaan Miljan | | |
| Place and date: | | | Tartu 2018 | | |
| <p>With the aim of reducing energy use in buildings, according to the EU Energy Performance of Buildings Directive, all new buildings in the member states are subject to the requirements for near zero-energy buildings starting from 1 January 2021 (public buildings starting from 1 January 2019). In the light of the tightening requirements, there is an increasing need for new energy-efficient building materials and technologies.</p> <p>The aim of the thesis was to study the thermal characteristics of the building envelope of residential houses constructed with Structural Insulation Panels (SIP) as well as to compare them with stick frame construction and the minimum energy efficiency requirements.</p> <p>In order to perform energy calculations and compare results, an architectural project of the reference building was drawn up along with the main intersection drawings, presented in two different options: with Structural Insulated Panels and stick frame construction. Applying the current standards and using the calculation program <i>Therm</i>, the thermal transmittances of the building envelope and joints of the two buildings were studied.</p> <p>According to the results of the calculations, the total heat loss of the outer walls of both types of construction was divided in the same proportion between the outer walls and the joints of the outer walls (83% and 17% of the total heat transfer respectively). According to the results, the total heat loss of the outer walls of the building with SIPs was 7.5% lower than the one of the building with stick frame. The resulting 7.5% difference is not enough to justify the sue of SIPs in the Estonian construction market. Based on the theoretical calculations, the advantages of SIPs do not outweigh the ones of stick frame.</p> | | | | | |

Examining the properties of air permeability of SIPs by the example of an experimental building allows to outline the potential of this material.

Keywords: Structural Insulated Panels, SIPs, stick frame construction, thermal analysis, thermal transmittance, thermal bridges, heat-transfer analysis, Therm.

SISUKORD

| | |
|--|----|
| SISUKORD | 5 |
| SISSEJUHATUS | 7 |
| 1. TEOREETILINE ÜLEVAADE | 9 |
| 1.1. Energiatõhususpoliitika Euroopa Liidus ja Eestis | 9 |
| 1.2. Piirdetarindite mõju hoone energiakulule | 11 |
| 1.2.1. Piirdetarindite soojusläbivus | 11 |
| 1.2.2. Külmasillad | 12 |
| 1.2.3. Piirdetarindite õhupidavus | 13 |
| 1.2.4. Piirdetarindi niiskustehniline toimivus | 14 |
| 1.3. SIP-paneelid | 14 |
| 1.3.1. Ajalugu ja üldine osa | 14 |
| 1.3.2. SIP-paneelide koostematerjalid | 20 |
| 1.3.3. SIP-süsteemi kirjeldus | 25 |
| 1.3.4. SIP-süsteemi tugevad ja nõrgad küljed | 29 |
| 1.3.5. SIP-paneelide katsetused | 32 |
| 2. MATERJAL JA METOODIKA | 38 |
| 2.1. Võrdlushoone ja kasutatud materjalide kirjeldus | 38 |
| 2.1.1. Võrdlushoone kirjeldus ja tehnilised andmed | 38 |
| 2.1.2. Materjalide valik ja konstruktsioonide dimensioneerimine | 39 |
| 2.1.3. Võrdlushoone tarinditüüpide kirjeldused | 40 |
| 2.2. Hoone välispiirete soojusläbivuse arvutus | 44 |
| 2.3. Külmasillad | 52 |
| 2.4. Temperatuurivälja arvutusprogramm Therm 7.6 | 53 |
| 2.5. Joonkülmasildade arvutus | 55 |
| 2.6. Temperatuuriindeksite arvutus | 56 |
| 2.7. Välispiirde kondenseerumisriski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga | 57 |

| | |
|---|-----|
| 3. TULEMUSED JA ARUTELU | 62 |
| 3.1. Hoonete välispiirete soojusläbivuse arvutus..... | 62 |
| 3.2. Joonkülmasildade arvutus..... | 64 |
| 3.3. Tähtsamate sõlmede temperatuuriindeksite arvutused Therm andmete järgi..... | 67 |
| 3.4. Välispiirete summaarne soojuserikadu | 68 |
| 3.5. Välispiirde kondenseerumisriski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga... | 70 |
| KOKKUVÕTE | 72 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 75 |
| LISAD | 78 |
| Lisa 1: Välispiirete soojusläbivuste arvutused | 78 |
| Lisa 2: Külmasildade analüüs..... | 86 |
| Lisa 3. Temperatuuriindeksite arvutused | 98 |
| Lisa 4. Välispiirde kondenseerumisriski arvutus Glaseri meetodiga | 100 |
| Lisa 5: Võrdlushoone plaanid ja vaated | 112 |

SISSEJUHATUS

Euroopa Liidu hoonete energiatõhususe direktiivi kohaselt peavad kõikide liikmesriikide uusehitised pärast 31. detsembrit 2020 vastama liginullenergiahoonete kriteeriumitele. Samadele nõuetele peavad vastama kõik riigiasutuste omandis ja kasutuses olevad uusehitised pärast 31. detsembrit 2018. Ligemale 30% Euroopa Liidu energia lõpptarbimisest langeb kodumajapidamiste arvele. Hoonete energiatõhusamaks muutmises peitub suur energiasäästu potentsiaal kogu Euroopa Liidu jaoks.

Hoone piirdetarindite soojuslähivus ja õhupidavus on hoone energiatarvet enim mõjutavad tegurid, mistõttu on soojapidav ja õhutihe majakarp energiasäästlikkuse seisukohalt ülioluline. Selle saavutamiseks on kasutusel palju erinevaid materjale ja tehnoloogiaid. Käesolevas töös soovitakse leida alternatiivseid variante Eesti ehitustusturul juba kasutusel olevale traditsioonilisele puitkarkasshoonele.

Magistritöö eesmärgiks on konstruktiivsete soojusisolatsioonipaneelide ehk SIP-paneelide (*structural insulated panels*) soojus- ja niiskustehniliste omaduste teoreetiline uurimine ning saadud tulemuste võrdlemine puitkonstruktsiooniga. SIP-paneel on kolmekihiline komposiitpaneel, mis koosneb jäigast soojustusmaterjaliga isolatsioonikihist ja selle mõlemale küljele kinnitatud konstruktiivsest ehitusplaadist. SIP-paneelidel põhineb ehitustehnoloogia on laialdaselt kasutusel Ameerikas, Kanadas, Ukrainas ja Venemaal. Autorile teadaolevalt Eesti ühtegi SIP-süsteemil põhinevat elamut ehitatud ei ole.

Magistritöö on jaotatud kolme ossa. Töö esimeses osas tehakse põgus ülevaade Euroopa Liidu poolt kehtestatud hoone energiatõhusust puudutavatest direktiividest ja Eestis kehtivatest energiatõhusust käsitlevatest seadusandlikest dokumentidest. Tehakse ülevaade SIP-paneelide ajaloost ja kirjeldatakse lähemalt SIP-süsteemi ning kasutatavaid ehitusmaterjale. Töö teises osas kirjeldatakse uurimisobjektiks oleva võrdlusmaja konstruktsioonide lahendusi, kasutatavaid materjale ja arvutusmetoodikat. Kolmandas osas on esitatud töö tulemused koondtabelitena ja arutelu. Lisamaterjalides on esitatud teostatud

arvutuskäigud ja põhiliste liitekohtade temperatuurivälja arvutuste sõlme- ning arvutusmodeli joonised.

Töö eesmärk ja ülesanded

Otsides alternatiivseid lahendusi traditsioonilisele puitkarkasshoonele on lõputöö eesmärgiks uurida SIP-paneelidest projekteeritud hoone välispiirete soojus- ja niiskustehnilisi omadusi ning võrrelda neid puitkarkasshoone omadega. Võrreldavate andmete saamiseks koostatakse väikeelamu projekt kahe erineva lahendusega: SIP-paneelidega ja puitkarkassiga. Võrdlushoonete piirdetarindite konstrueerimisel kasutatakse samaväärse soojuserijuhtivuse, kihipaksuse ja hinnaklassiga soojusisolatsioonimaterjale. See tähendab, et mõlema hoone seina- ja katusekonstruktsioonide soojusläbivused on võrdsed või minimaalse erinevusega. Arhitektuurses plaanis on mõlemad projektid identsed. Kokkuvõtlikult on töö eesmärgiks võrrelda SIP-süsteemi soojus- ja niiskustehnilisi omadusi puitkarkasshoone omadega samade lähteandmete juures.

Töös lahendatavad ülesanded:

- võrdlushoone puitkarkassi ja SIP-paneelide projekti koostamine;
- tutvumine Eesti energiatõhususe miinimumnõuete, teemakohaste normdokumentide ja tööks vajalike programmidega (Therm 2D soojuslevi arvutusprogramm);
- välispiirete soojusläbivuse leidmine kasutades standardite arvutuspõhimõtteid;
- olulisemate liitekohtade (põrand pinnasel - välissein, välisnurk, välissein – vahelagi, räästasõlm, harjasõlm, akna seinakinnitus) temperatuurivälja ja külmasildade joonsoojusläbivuse arvutus;
- välispiirete kondenseerumiskiriski arvutamine Glaseri meetodil;
- välispiirete soojuserijuhtivusest ja õhu infiltratsioonist tingitud välispiirete soojuskaod;
- välispiirete summaarse soojuserikao leidmine köetava pinna ruutmeetri kohta;
- arvutatud tulemuste võrdlemine;
- tulemuste analüüs.

1. TEOREETILINE ÜLEVAADE

1.1. Energiatõhususpoliitika Euroopa Liidus ja Eestis

Euroopa Liidu kliima- ja energiapoliitika

Hoonete energiatõhususe tõstmine on üks osa suuremast Euroopa Liidu kliima- ja energiapoliitikast, millega on seatud eesmärgid aastateks 2020 (Strateegia „Euroopa 2020“ nn 20-20-20 eesmärgid) kuni 2050. Kliimamuutused ja energia jätkusuutlikus on üks viiest „Strateegia 2020“ põhiteemast. Eesmärgiks on vähendada kasvuhoonegaaside heitkogust vähemalt 20% (võrreldes 1990. aastaga), suurendada taastuvenergia osakaalu energiatarbimises 20%-ni ja suurendada energiatõhusust 20% võrra. Esimesed kaks eesmärki muudeti siduvaks 2009. aastal jõustunud kliima- ja energiapaketi (vastavalt Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv nr. 2009/29/EÜ ja nõukogu otsus nr. 406/2009/EÜ). Kolmanda eesmärgi saavutamiseks on vastu võetud „Hoonete energiatõhususe direktiiv 2010/31/EL“. [1]

Direktiividega vastu võetud eesmärgid saavutab Euroopa Liit liikmesriikide abiga sätestades riiklikud eesmärgid ning arvestades seejuures riikide erinevaid lähtepositsioone ja arengutasemeid. Näiteks taastuvenergia osakaal energiatarbimisest 2020. aastal oleks Malta puhul 10%, samas kui Rootsil on see näitaja 49%. Energiatõhususe parandamiseks vastu võetud riiklikud eesmärgid kehtestati mittesiduvalt. [1]

Energiatõhususe direktiivi järgi peab iga riik välja töötama energiatõhususkohustuste süsteemi ning poliitilised meetmed energiatõhususe saavutamiseks kõigis energia põhisektorites. Suurimad reservid energia säästmiseks ja heidete vähendamiseks leiduvad hoonete energiatõhususe valdkonnas [2].

Hoonete Energiatõhususe direktiiv

19. mail 2010. aastal vastu võetud Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL on peamine Euroopa Liidu tasandil toimiv õigusakt hoonete energiatõhususe suurendamiseks,

millega sätestatakse konkreetne ajaline tegevuskava koos lõppeesmärgiga kõikide liikmesriikide jaoks. Direktiivi eesmärgiks on liidu siseselt parandada hoonete energiatõhusust, arvestades seejuures kohalikku seadusandlust, hoone asukoha kliimatingimusi, ruumide sisekliimat ja kulutasuvust. [3]

Energiatõhususe direktiivi põhiline fookus on suunatud järgmistele punktidele [3]:

- hoonete ja hoone osade üldise energiatõhususe arvutamise ühise üldraamistiku loomine;
- uute hoonete ja hoone uute osade energiatõhususe miinimumnõuete rakendamine;
- riikliku energiamärgise väljastamise süsteemi loomine;
- riiklikud kavad liginullenergiahoonete arvu suurendamiseks.

Liikmesriigid kehtestavad vastavalt energiatõhususe direktiivi I lisas kehtestatud hoonete energiatõhususe arvutamise üldraamistikule piirkondliku energiatõhususe arvutamise meetoodika [3].

Energiatõhususe arvutamise meetoodika

Energiatõhususe arvutamise meetoodikale tuginedes kehtestavad liikmesriigid hoonete või hoone osade energiatõhususe miinimumnõuded, mille eesmärgiks on saavutada kulutõhus tase. Miinimumnõuete kehtestamisel on lubatud teha erisusi uute, vanade ning eri liiki hoonete vahel [3].

Uued hooned peavad vastama energiatõhususe miinimumnõuetele ning enne ehitamise algust tuleb kaaluda erinevaid küttesüsteemide paigaldamise võimalusi. Olemasolevate hoonete olulisel rekonstrueerimisel tuleb energiatõhusust suurenda vähemalt energiatõhususe miinimumnõuete tasemeni [3].

Energiamärgise süsteem

Liikmesriikide poolt sätestatakse vajalikud meetmed energiamärgisesüsteemi loomiseks. Energiamärgisele kantakse hoone energiatõhususarv ja energiatõhususe miinimumnõuded [3].

Liginullenergiahoonete arvu suurendamine

Liikmesriigid kehtestavad riiklikud kavad liginullenergiahoonete arvu suurendamiseks, mis võivad sisaldada eri liiki hoonetele erinevaid eesmärgi. Energiatõhususe direktiivi järgi peavad alates 1. jaanuarist 2021. a kõik uusehitised olema liginullenergiahooned ning samu nõudeid peavad täitma ka riigi omandis ja kasutuses olevad uusehitised alates 1. jaanuarist 2019. a. [3].

Ligemale 30% [4] Euroopa Liidu ja 40% [5] Eesti Vabariigi energia lõpptarbimisest langeb kodumajapidamiste arvele, ca 70% [6] sellest energiast kulub hoonete kütmise ja jahutamise peale. Eelnimetatud näitajatele tuginedes võib väita, et hoonete energiatõhusamaks muutmises peitub suur majanduslikult tasuv energiasäästu potentsiaal kogu Euroopa Liidu jaoks. Energiatarbimise vähendamine ja taastuvenergia kasutamine on oluline osa Euroopa Liidu energiasõltuvuse ja kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamiseks ette nähtud meetmetest. [3]

Eesti Vabariigis reguleeritakse hoonete energiatõhususe valdkonda järgmiste MTM määrustega: Hoone energiatõhususe miinimumnõuded, Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika ja Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele. Lisaks on koostatud erinevate asutuste (MKM, RKAS, KredEx) poolt ja tellimusel hoonete energiatõhususe alaseid norme, analüüse ja juhendeid.

1.2. Piirdetarindite mõju hoone energiakulule

Hoone piirdetarinditest tingitud soojuskadu sõltub põhiliselt kolmest tegurist:

- soojuskaod läbi piirdetarindite;
- piirdetarindite külmasillad;
- piirdetarindite õhulekked.

Hoone soojuskadude ja küttekulude minimaliseerimiseks peavad hoone piirdetarindid olema piisavalt soojustatud, õhutihedad ja külmasildade soojusläbivused minimaalsed. [7]

1.2.1. Piirdetarindite soojusläbivus

Piirdetarindite põhiliseks eesmärgiks on eraldada hoone sisekeskkond väliskeskkonnast ja tagada hea sisekliima. Piirdetarindid mõjutavad hoone energiatõhusust eelkõige tarindi soojuslähivuse, õhupidavuse ja avatäidete suuruse ning nende paiknemise kaudu. Piirdetarindite kaudu toimuv soojuskadu moodustab suure osa kogu hoone energiakulust, seega on energiatõhususe saavutamise seisukohast on ülioluline parandada piirdetarindite soojapidavust. [8]

Hoonete välispiirded peavad olema pikaajaliselt õhkupidavad ja piisavalt soojustatud. Otstarbeka soojustuse määramisel lähtutakse hoone energiatõhususe nõuetest, ruumide soojuslikust mugavusest ning hallituse ja kondensaadi vältimisest külmasildadel, sisepindadel ja tarindites. Piirete soojuslähivus arvutatakse standardite EVS-EN ISO 6946 ja EVS-908-1 järgi. [9]

Piirdetarindite (põrand, seinad, katus) soojuskaod arvutatakse vastavalt tarindi soojuslähivusele ja sisemõõtudega arvutatud pindalale. Liitekohtadest ja muud võimalikud tarinditest tulenevad soojuskaod võetakse arvesse punkt- või joonsoojuslähivustega. Arvutusmetoodika on täpsemalt kirjeldatud peatükis 2.2. [8].

Tarindite soojuslähivusele esitatud nõuded on sätestatud MKM määrusega „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“.

1.2.2. Külmasillad

Külmasild on koht piirdetarindis, kus soojusjuhtivus on lokaalselt suurem ümbritseva tarindi soojusjuhtivusest. Põhimõttelt võib külmasillad jagada kaheks: a) geomeetrilised (erinevate tarindite liitumisel tekkivad külmasillad: välisnurk, põrand – välissein); b) konstruktiivsed külmasillad (lähiviigud soojustusekihist, tarindite liitekohad) [7].

Külmasildade põhiline kahjulikkus seisneb soojusvoolu suurenemises läbi tarindi ja tarindi sisepinna temperatuuri alanemises. Lisaks külmasillale võib eelkirjeldatud olukorda põhjustada ka soojustuse puudumine, soojustus ebakvaliteetne paigaldus, soojustuse märgumine, õhulekked ning tehnosüsteemide toimivus. [7]

Külmas kliimas on külmasildade arvestamine oluline järgmistel põhjustel [7]:

- madalamast seina sisepinna temperatuurist tulenev kondensatsioonirisk ja sellega kaasnev võimalik konstruktsioonide kahjustumine ja mikroorganismide areng;
- madalatest pinnatemperatuuridest tingitud suurenenud õhuliikumisest ja ebasümmeetrilisest kiirgusest põhjustatud soojuslik ebamugavus;
- külmasildadest tingitud soojuskadu.

Sarnaselt piirdetarindite soojusläbivuste arvutamisele lähtutakse külmasildade arvutamisel samuti konstruktsioonide sisemõõtudest. Külmasildade arvutamiseks jagatakse hoone liitekohad üksikuteks tasapinnalisteks osadeks ja nende vahelisteks liitekohtadeks. Temperatuurivälja programmiga koostatakse liitekohta arvutusmudel, mis peab vastama EVS-EN ISO 10211:2017 sätestatud arvutusulatus tingimustele. Arvutusprogrammiga leitakse arvutusulatust läbiv soojusvool ja teades liitekohaga külgnevate tarindite soojusläbivusi on võimalik arvutada liitekohta joonsoojusläbivus. Külmasilla kriitilisust hinnatakse temperatuuriindeksi abil. [10]

1.2.3. Piirdetarindite õhupidavus

Piirdetarindite ebapiisav õhupidavus väljendub planeerimatu ja kontrollimatu õhuvoolu näol läbi pragude ja ebatiheduste hoonete piiretes. Õhu infiltratsiooni mõju sõltub erinevatest teguritest: piirdetarindite õhupidavus, lekkekohtade paiknemine, õhurõhkude erinevus, kliimatingimused ja kahel pool piiret kasutatavate materjalide omadustest. Piirdetarindite õhupidavus mõjutab otseselt hoone kütte- ja jahutuskulusid. [7]

Piirdetarindi ebatihedusest tingitud probleemid [7]:

- suurenenud kütte- ja jahutuskulud;
- niiskustehnilised probleemid;
- hallituse ja õhusaaste levik eluruumidesse;
- piirdetarindite pindade jahtumine;
- sisekliima kvaliteet, tuuletõmbus;
- tuleohutus;
- müraprobleemid;
- ventilatsioonisüsteemide toimivus.

Hoone õhupidavust mõjutavad kõik piirdetarindi ja selle erinevate osade (aknad, ukSED, liitekohad) õhupidavused ning selle tagamine nõuab läbimõeldud ja komplekseid lahendusi [7].

Hoone piirdetarindite õhupidavust iseloomustab õhulekkearv q_{50} (ühik $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$), mis näitab õhuvooluhulka (m^3/h), mis läbib 1 m^2 suuruse pindalaga piiret õhurõhkude erinevuse 50 Pa juures (tavapäraselt). Õhupidavust iseloomustab ka n_{50} arv, mille mõõtühikuks on $1/\text{h}$ ja mis väljendab õhuvahetuskordsust hoones õhurõhkude erinevuse 50 Pa juures. Hoone õhupidavust mõõdetakse blower-door-testi ehk rõhutesti abil. [7]

1.2.4. Piirdetarindi niiskustehniline toimivus

Niiskustehnilise projekteerimise eesmärgiks on kavanda niiskusest tekkivate probleemide vaba konstruktsioon. Piirdetarindi eesmärgiks on tagada siseruumides soovitatav sisekliima. Piirde niiskussisaldus ei tohi mõjutada hoone kestvust või kasutamist. Võimalik liigniiskus peab saama piiretest kiiresti välja kuivada. Tarindite niiskustehnilisel projekteerimisel on oluline arvestada sise- ja väliskliima tingimustega. [11]

1.3. SIP-paneelid

1.3.1. Ajalugu ja üldine osa

SIP-paneelide ajalugu

SIP-paneelide areng sai alguse rohkem kui 80 aastat tagasi Ameerika Ühendriikide Põllumajandusministeeriumile kuuluvast *Forest Products Laboratory* (FPL) nimelisest rahvuslikust teaduslaborist. Idee sai alguse soovist kasutada sandwich konstruktsioone elamute piirdekonstruktsioonides. FPL-i teadlased tulid mõttele kanda seinale mõjuvad koormused üle sandwich paneeli välimistele kandvatele kihtidele. Jäigalt massiivse (võrreldes paneeli mahuga) isolatsioonikihi külge liimitud välimised kandvad kattedkihid võtavad vastu enamuse seinale mõjuvast koormusest. Uurimustööde aluseks olnud esimene paneeli prototüüp konstrueeriti vineeritahvlite vahele liimitud puitprussidest, mille

tulemusena vähenes seinas kasutatava karkassiposti ristlõige ca 1,7 korda. Sellega algas SIP-paneelide areng. [12]

Esimene SIP-paneelidega katsemaja ehitati 1937. aastal ja selle hoone puhul kasutati paralleelselt SIP-paneelidele ka puidust jäigastavaid elemente, aga oluliselt väiksemas mahus kui tavapärase puitkarkass hoone puhul. 1947. aastal ehitati teine katsemaja, mille seinte konstrueerimisel kasutati ainult SIP-paneele. SIP-paneelid konstrueeriti pabermaterjalist kärgpaneelidest ja erinevatest ehitusplaatidest (vineer, puitkiud- ja puitlaastplaat). [12]

Järgneva 31 aasta jooksul katsetati hoone konstruktsioone erinevates olukordades ja kombinatsioonides: kütterežiimil, erineval niiskusrežiimil, ilmastikule avatuna, seintes kasutati erinevaid soojusisolatsiooni/täite materjale jne. Katseperioodi jooksul mõõdistati paneelide läbinõtkumist (tulemus: minimaalne), võeti hoone tarinditest paneele purustavateks tugevuskatseteks (nt eemaldati tarindist üks paneel, mis lõigati pooleks, selle paneeli üks pool läks katsetamisele ja teine pool paigaldati konstruktsiooni tagasi), paigaldati teistsuguse materjalikombinatsiooniga SIP-paneele jne. Olenemata paneelide jooksvast katsetamisest ja asendamisest olid suurem enamus paneele siiski terve katseperioodi kasutusel. 1978. aastal võeti katsemaja paneel-paneeli kaupa lahti ja teostati kõikidele paneelidele purunemiskatse (*destructively tested loading to failure*). Enamus paneelidest säilitasid aja jooksul samad jäikus- ja tugevusomadused võrreldes esialgsete tootmisprotsessi käigus läbi viidud katsete tulemustega. Põhilised puudused tulenesid mõningate materjalid mittesobivusest väliskeskkonda. Mitte ühelgi purunemiskatsel ei tuvastatud liimühenduse katkemist. Põhiliseks katsekeha purunemise põhjuseks oli isolatsiooni-/täitekihi välja nõtkumine. [13]

FPL-i teadlased ei olnud ainukesed, kes komposiitpaneeli idee kallal töötasid. 1930. aastatel alustas tööd oma kontseptsiooni kallal ka maailmakuulus arhitekt Frank Lloyd Wright. Arhitekt Wright oli erakordselt innovatiivne ja jõudis selle kontseptsioonini läbi oma pingutuste ühendada eramaja ehituses lihtsus, kvaliteetne arhitektuur ja kuluefektiivsus. Tema poolt väljatöötatud prototüüp koosnes kolmest kihist vineerist ja nende vahel asuvast kahest kihist tõrvapapis. Halbade soojusisolatsiooniomaduste tõttu seda paneeli väga laialt ja märkimisväärses mahus ei kasutatud. [14]

Suurem läbimurre toimus 1952. aastal, kui Frank Lloyd Wrighti õpilane, Alden B. Dow (kuulsa keemiatöösturi Herbert Henry Dow järeltulija) tootis esimese isolatsioonikihiga SIP paneeli. Paneel koosnes ca 16mm paksusest ekstrudeeritud polüstüreenikihist, mille kummalegi küljele oli konstruktsiooni jäikuse tagamiseks liimitud 8 mm paksune vineerplaat [14].

1950. – 60. aastatel ehitati veel mõned katsemajad ja üks suurem ehitusfirma alustas ka SIP paneelide tootmisega, mis väikese nõudluse tõttu rauges peagi. Alates sellest ajast on mitmed väiksemad ettevõtted tegelenud tootmisprotsesside ja SIP paneelide arendamisega. 1970. aastatel alustati SIP paneelide reklaamimist alternatiivse variandina puitkarkass majadele [15].

Tulenevalt 1990. aastatel laiemalt kasutusele võetud CAD/CAM tarkvara ja CNC tehnikast muutus SIP paneelide tootmine oluliselt lihtsamaks, kiiremaks ja kvaliteetsemaks. Samal ajal loodi Ühendriikides ka SIP paneelide tootjaid ja majaehitajaid ühendav katuseorganisatsioon SIPA (*Structural Insulated Panel Association*), mis koostöös APA-ga (*Engineered Wood Association*) aitaks suurendada SIP-paneelide turuosa ehitussektoris [16].

SIP-paneelide turuosa suuruse ja selle osakaalu kohta kogu ehitussektori mahust värske informatsioon kahjuks puudub. 1999. a Ameerika Ühendriikidest koostatud turu-uuringu järgi oli SIP-paneelide turuosa ca 0,5-1% kogu elamuehitussektorist [12]. Ajaloolistel põhjustel ongi suurim turg ilmselt Ameerika Ühendriikides. 2003. aastal SIPA poolt välja antud andmete järgi oli SIP-paneelide turumaht 350-525 miljonit dollarit ja prognoositav kasv 4-12% aastas. Hoone tüübilt jaguneb SIP-paneelide turg võrdselt elu- ja ärihoonete vahel. Välimise katematerjali poolest jaguneb turg järgmiselt: 50% metallist, 42% OSB, 6% OSB ühel küljel ja 2% ülejäänud teised materjalid (vineer, tsementkiud, plastik, kips jne). Ärihoonetes kasutatakse enamasti metallist kattekihiga paneele, elamusektoris OSB-ga kaetud paneele. [16]

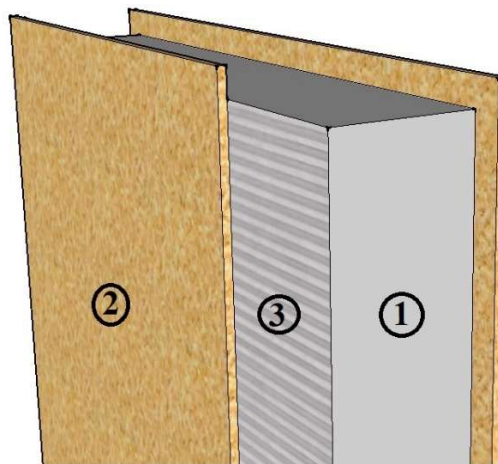
SIP-paneelidest üldiselt

SIP-paneelid on kõrge soojapidavusega kolmekihilised komposiitpaneelid, mida enamasti kasutatakse eramute ja väiksemate ärihoonete ehitamisel. SIP paneelid toodetakse tehase

kontrollitud tingimustes vastavalt hoone arhitektuursele lahendusele ja tarnitakse komplekteerimiseks ehitusobjektile. Põhiliselt kasutatakse SIP-paneele hoonete põrandate, seinte, vahelagede ja katuste püstitamisel ning harvemal juhul ka vaheseinte ehitamiseks ning fassaadide katmiseks ja soojustamiseks. Järgides rangelt tootjapoolseid paigaldusjuhiseid on SIP-paneelidest võimalik ehitada tugev, sooja- ja õhupidav hoone välispiire. [17]

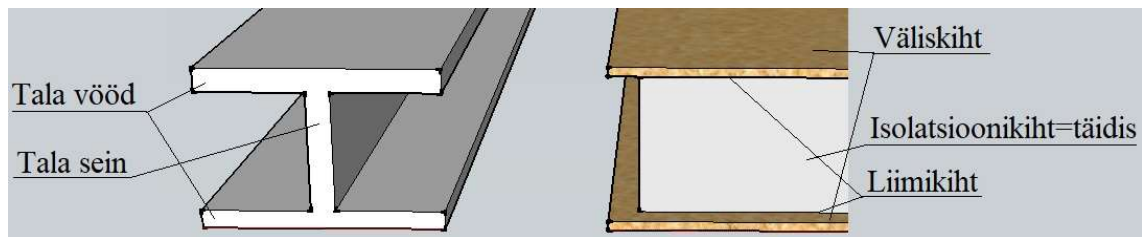
SIP-paneelide mõiste on lai ja selgesõnaliselt defineerimata, olles ühiseks nimetajaks kõigile kolmekihilistele paneelidele olenemata soojustuse või välimise kattekihi materjalist. Käesolevas töös keskendutakse ehitusplaatidega kaetud paneelidele ja põhifookus on suunatud OSB/EPS kombinatsioonil SIP-paneelile.

SIP-paneel koosneb kolmest erinevast komponendist: 1) väikse tihedusega, mahult massiivne, jäigast soojustusmaterjalist isolatsiooni-/täitekiht 2) isolatsioonikihti mõlemalt küljelt kattev konstruktiivne väliskiht/-koorik 3) soojusisolatsioonikihti ja välimisi kihte ühendav liimikiht (vt joonis 1).



Joonis 1: SIP-paneeli materjalikihid: 1) soojustus 2) väliskoorik 3) liimikiht.

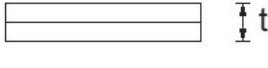
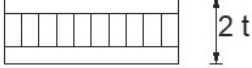

SIP-paneeli välimisi kihte võib võrrelda I-tala vöödega (vt joonis 2), millele mõjuvad paindepinged: üks pool on surve- teine tõmbetsoonis. Isolatsioonikihi ülesandeks on väliskoorikute teineteisest eraldamine ja nende toetamine läbinõtkumise vältimiseks, suurendades seeläbi kogu konstruktsiooni jäikust. Liimikiht seob paneeli erinevad komponendid jäigalt ühtseks suure väände- ja paindejäikusega komposiitpaneeliks. [18]



Joonis 2: SIP-paneeli ja I-tala analoogia näidis.

SIP-paneeli puhul on tööpõhimõttelt tegemist „sandwich“ komposiitpaneeliga, mille mehaanilisi omadusi iseloomustab tabel 1, mis kirjeldab ilmekalt kuidas kahe erineva materjali kombineerimisel on minimaalse massi suurenemise juures võimalik oluliselt parandada komposiitpaneeli mehaanilisi omadusi. Näide põhineb 2 mm alumiiniumist väliskoorikuga kärgpaneelil ja kõik väärtused on esitatud suhtarvudena [19].

Tabel 1: Alumiiniumplaadi ja alumiiniumplaadiga kaetud komposiitpaneeli mehaanilised omadused sõltuvalt täitekihi paksusest, väljendatuna suhtarvudena [19]

| | Alumiiniumplaat | Komposiitpaneel 1 | Komposiitpaneel 2 |
|----------------|---|--|---|
| Skeem |  |  |  |
| Täidise paksus | 0 | 1t | 3t |
| Jäikus | 1 | 7 | 37 |
| Paindetugevus | 1 | 3,5 | 9,2 |
| Kaal | 1 | 1,03 | 1,06 |

SIP-paneelide puhul on võimalik kasutada palju erinevaid materjalikombinatsioone, lähtudes eelkõige konstruktsioonile esitatavates tingimustest. Soojusisolatsioonimaterjalidena kasutatakse peamiselt polümeerseid jäiku vahtmaterjale. Väliskoorikuna kasutatakse plast-, puit- ja metallmaterjale või erinevaid ehitusplaate (magneesiumoksiidplaat, tsementkiudplaat jne.). Kandvate paneelide puhul kasutatakse välimise kihina OSB- või tsementkiudplaati, mittekanvate seinte puhul on võimalik kasutada ka teisi materjale. Liimmaterjalid valitakse sõltuvalt isolatsiooni ja koorikmaterjali kombinatsioonist. Elamuehituses on enamlevinud SIP-paneeli tüüp EPS-soojustus kombineeritud OSB-plaadiga.

Lähtematerjalist ja regioonist tulenevalt on SIP paneelide mõõtmed kindlalt piiritletud. Paneelide maksimaalse suuruse määrab välimise kihina kasutatava materjali tüüpne tehasemõõt kuna SIP-paneeli kattev materjal peab kogu paneeli ulatuses olema ühtne (näiteks tsementkiudplaadi puhul on standardmõõtmeteks 300...1200x2400...3600mm, OSB puhul 300...1250x2500...7500mm, mõõdud võivad erineda regiooniti). Mõningate eranditega on võimalik koostada mitmest väiksest paneelist koosnevaid suuremate mõõtmetega paneele (inglise keelne nimetus *jumbo panels*). Soojusmaterjali kihipaksus sõltub suuresti kasutatavast materjalist ja sõltuvalt sellest on see tavapäraselt vahemikus 70-250 mm. Olenevalt tootjast on saadaval ka erimõõtmelised ja sfäärilised paneelid. Lai lähtematerjalide valik ja nende omavahelise kombineerimise võimalus annab SIP-paneelidele mitmekülgse kasutusvõimaluse. [17]

SIP-paneele on lihtne sobitada teiste konstruktsioonitüüpidega ja tihti kasutatakse neid koos puit- ja metallkonstruktsioonidega. Kõrgete ja avarate ruumilahenduste korral ehitatakse puidust või metallist kandekonstruktsioon, mis kaetakse SIP-paneelidega, sest SIP-paneeli enda mõõtmed ja omadused üksi sellist konstruktsiooni ei võimalda püstitada. SIP-paneele kandva elemendina kasutades saab neist ehitada kuni 3-kordseid hooneid (mõne üksiku erandina ka 4-kordseid, mille puhul on limiteeritud 1-korruse avade pindala ja nende paiknemine).

Vastavalt hoone arhitektuursele projektile koostatakse hoone konstruktiivne tööprojekt, mis sisaldab endas ka kõikide paneelide tootejooniseid. Kõik paneelid ja teised hoone püstituseks vajalikud ehituselemendid toodetakse tehasetingimustes ning komplekteeritakse ehitusobjektile (vt joonis 3).



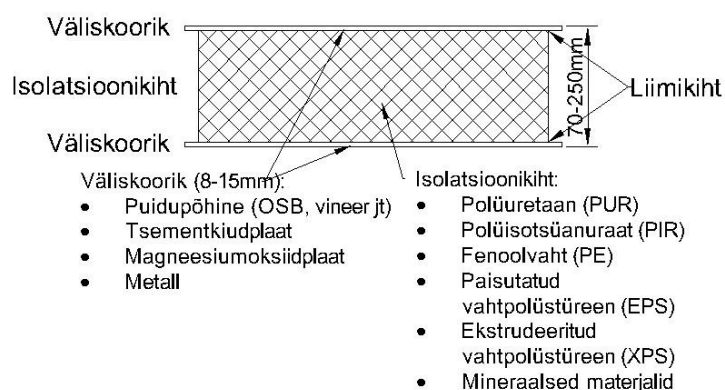
Joonis 3: SIP-paneelide 3D-joonis [20].

Sujuva ehitusprotsessi tagamiseks ja objektil tekkida võivate probleemide ennetamiseks koostatakse hoone SIP-projekti kohta 3D-mudel (vt joonis 3).

SIP-paneelidest hoone ehitusprotsess ja vajaminevad tööriistad ning tehnika on sarnased puitkarkasshoonele. Sõltuvalt lähteülesandest on vajalikud mõned lisatööriistad (kuum traat, ümber modifitseeritud lõiketööriistad). SIP-paneelide kõik ühendused tugevdatakse puidu või spetsiaalse ühenduselemendiga ja tihendatakse mastiksiga. Kinnitusvahenditena kasutatakse kruvisid ja naelu. Hoone ehitustööde käigus tuleb SIP-paneele kaitsta sademete ja liigniiskuse eest [21].

1.3.2. SIP-paneelide koostematerjalid

SIP-paneelide konstrueerimisel kasutatavate materjalide valik ja nende kombineerimise võimalus on lai. Laialdasemalt kasutatavate materjalide valik joonisel 4.



Joonis 4: SIP-paneelide konstrueerimisel kasutatavate materjalide valikud [22].

Väliskoorik

Väliskooriku ülesandeks on konstruktsioonile jäikuse andmine ja isolatsioonikihi kaitsmine väliskeskonna eest. Ideaalne väliskoorik vastab järgmistele tingimustele: suur paindejäikus, suur surve- ja tõmbetugevus, löögikindlus, kvaliteetne pinnaviimistlus, vastupidavus välistele mõjutustele (UV-kiirgus, temperatuurikõikumine, keemilised mõjurid jne.) ja kestvus. Kattematerjalidena kasutatakse enamasti puidu või mõnel muul materjalil põhinevaid jäiku ehitusplaate või metalli. Enamkasutatavate materjalide eeliste ja puuduste võrdlus toodud tabelis 2. [23]

Tabel 2: SIP-paneelide levinumate kattematerjalide eelised ja puudused [16, 24]

| Jrk nr. | Materjal | Eelised | Puudused |
|---------|-------------------|---|---|
| 1. | OSB | võrreldes teistega soodne; kergesti kättesaadav; kerge töödelda; käsitletud ehitusstandardites ja katsetatud SIP-ina; SIP-süsteemis käsitletav kandva elemendina; | niiskusega hallitab ja paisub; tuldkartev; vajab termiitide vastast kaitset; vajab viimistlemist; halb nakkuvus vuugiteipidega; |
| 2. | Tsementkiud-plaat | ei mädane; ei hallita; ei korrodeeru; tulekindel; termiitide kindel; ei vaja eraldi viimistlemist; ajas vastupidavam; | kaalult raskem; raskem töödelda; rabe - praguneb ja puruneb kergesti; hinnatasemelt kallim; SIP-ina katsetamata; piiratud mõõtmatega; |

| | | | |
|----|-----------------------|--|--|
| 3. | Metall | soodne hinnatase; kergesti kättesaadav; ajas kestev ja vastupidav; | vajab viimistelmist; |
| 4. | Vineer | tugevusomadused; | kättesaadavus; hinnatase; piiratud mõõtmetega; niiskusega hallitab; tuldkartev; vajab termiitide vastast kaitset; |
| 5. | Magneesiumoksiidplaat | ei hallita; termiitide kindel; tulekindel; | kättesaadavus; SIP-ina katsetamata; piiratud mõõtmetega; |

Suunatud laastuga plaat (OSB) on kõige levinum SIP-paneelide kattematerjalina kasutatav materjal. OSB on tööstuslikult toodetud puitplaat, mis saadakse kihiliselt suunatud ristkülikukujuliste laastude kokku liimimisel suure surve all. Liimainena kasutatakse sünteetilisi vaike. OSB-plaate on katsetatud kandva materjaline erinevates tingimustes ja Ameerika elamuehituse standardi IRC järgi on OSB ainuke kandvates SIP-paneelides kattematerjalina aktsepteeritav materjal, millest toodetud SIP-paneelidest võib ehitada kuni 3-korruselisi elamuhuoneid. Võrreldes teiste kattematerjalidega on OSB saadaval kõige suuremate mõõtmetega. Ülejäänud puudused ja eelised vaata tabelist 2. [16]

Tsementkiudplaati kasutatakse oluliselt vähem kui OSB plaati. Samas on tsementkiudplaadil OSB ees mitmeid eeliseid. Tsementkiudplaadi peamised koostisosad tsement, tselluloos ja polüpropuleenkiud tagavad plaadi tugevuse, vastupidavuse ja tulekindluse. Tsementkiudplaati on võimalik toota erinevate viimistlusvalikutega (erinevad värvitoonid, erinevad mustrid jne), mis tagavad kiirema ehitusprotsessi ära jäävate viimistlustööde arvelt. Võrreldes teiste kattematerjalidega on tsementkiudplaat ajas kestmam ja vähem vastuvõtlikum välistele mõjuritele nagu tuli, niiskus ja termiidid. Suurimateks puudusteks on plaadi suur omakaal (võrreldes OSB-ga) ja limiteeritud mõõtmed ning raske töödeldavus. [16]

Teised materjalid (magneesiumoksiidplaadid, komposiitplaadid (klaasfiiber) jne) omavad marginaalset turuosa võrreldes OSB- ja tsementkiudplaadiga. See osa turust on alles välja kujunemas ja alternatiivseid materjale on erinevaid. Kasutusele võtmisele eelnevalt on vaja põhjalikult analüüsida ja katsetada materjalide omadusi ja sobivust ehituskonstruktsioonidesse, mis on iseloomult on väga aja- ja rahamahukas protsess [16].

Isolatsioonimaterjalid

Isolatsioonikihi ülesandeks on seina soojapidavuse tagamine, niiskuse liikumise takistamine ning vastupanu nihke- ja põikjõududele. SIP-konstruktsioonide puhul on isolatsioonimaterjalide tähtsamad omadused tihedus, nihkemoodul, lõikejäikus, jäikus risti välimiste kihtidega, soojusläbivus ja heliisolatsioon. Sellest tulenevalt kasutatakse SIP-paneelide soojustusmaterjalidena jäiku polümeerseid vahtplaste: paisutatud vahtpolüstüreen (EPS), ekstrudeeritud polüstüreen (XPS) ja polüuretaan (PUR) on levinumad. Soojusisolatsioonimaterjalide võrdlus on toodud tabelis 3 [23].

Olenevalt soojustusmaterjalist kasutatakse paneeli tootmiseks kahte erinevat protsessi: välimiste kandvate kihtide lamineerimine soojustuskihi külge või soojustuse injekteerimine valmis paneeli korpusesse. Lamineerimisprotsess on rohkem levinud, kulutõhus ja töökindel. Paneelide katsetamise tulemused on näidanud, et soojustuskiht puruneb enamasti alati enne liimikihti [25]. EPS ja XPS puhul kasutatakse lamineerimist, PUR puhul materjali injekteerimist. [26].

Paisutatud polüstüreen (EPS) on kõige levinum SIP-paneelides kasutatav soojustusmaterjal. 85% paneelidest on toodetud EPS isolatsioonikihiga [23]. EPS on suletud pooridega, niiskuskindel, väikse tiheduse ja heade soojusisolatsiooniomadustega materjal. EPS-i suurimaks miinuseks on halb ilmastikukindlus ja madal temperatuuritaluvus [27]. SIP-paneelides kasutatavatest soojustusmaterjalidest on EPS kõige kehvamate isolatsiooniomadustega ja hinnalt kõige odavam [24].

Ekstrudeeritud polüstüreen (XPS) on EPS-iga sarnane toode, kuid oluliselt paremate mehaaniliste omadustega veekindel materjal. XPS-i parematest mehaanilisest omadustest (surve-, painde- ja nihketugevus) tulenevalt on ka materjali hind märgatavalt kõrgem. Olenevalt toote tugevusklassist on limiteeritud ka maksimaalne soojustusplaadi paksus kuni 150mm (kõrgema survetugevuse korral on isolatsiooniplaadi õhemad). Lisaks eelnevale on XPS-plaatide puhul välimiste kihtide liimimiseks ideaalselt sileda pinna saavutamine problemaatiline. XPS kasutamine SIP-paneelide soojustamisel on vähe levinud [16].

Polüuretaan (PUR) on võrreldes eelnevatega parema soojus- ja veeaurutakistuse, tulekindluse ja kõrgema hinnatasemega isolatsioonimaterjal. PUR soojustusega paneele toodetakse vahu (vedelikuna) injekteerimisega paneeli sisse. Paisudes täidab vaht kõik

paneelis olevad tühimikud ja kuivades tekib vahu ning paneeli sisepinna vahele tugev liimliide. PUR paneelide puhul on sarnaselt XPS-ile paneeli paksusmõõde limiteeritud [16].

Tabel 3: SIP-paneelide soojustamisel enima kasutatavate materjalide omaduste võrdlus [24]

| Materjal | Eelised | Puudused |
|----------|--|--|
| EPS | teistest soodsam; soojustuskihi paksusmõõde ei ole limiteeritud; kerge kättesaadavus; kerge töödeldavus (ka ehitusobjektidel); | tulekindlus |
| XPS | tugevusomadused; veekindlus; | tulekindlus; kättesaadavus; limiteeritud mõõtmed; |
| PUR | kõrgeim soojustakistus R; tugevusomadused; veekindlus; | kõrgeim maksumus; kättesaadavus; raske objektidel töödelda/muuta; limiteeritud mõõtmed; roome; |

Liimikiht

Liimikihi ülesandeks on isolatsioonikihi ja väliskooriku ühtseks koostöötavaks komposiitpaneeliks sidumine. Liimikiht peab vastama kolmele põhilisele tingimusele [16]:

- **Liimliite tugevus:** liimliide peab olema piisavalt tugev (paine- ja nihketugevus) kandmaks üle välimiselt kihilt tulevaid koormusi isolatsioonikihile. Liimliide peab vastu pidama konstruktsiooni välja nõtkumisele ja hoonele mõjuvatele tuulekoormusele;
- **Termilised pinged:** vastupidav temperatuuri kõikumisele suures vahemikus. Termilised pinged on üks põhiline liimliite purunemise põhjused;
- **Niiskuskindlus:** liimliide peab olema niiskuskindel, vältimaks konstruktsioonis liikuvast niiskusest tekkida võivat liimliite purunemist.

Lisaks eelnevale on veel omadusi, millega liimliite projekteerimisel peab arvestama: sobivus liimitavate materjalidega, vajalikud eeltööd, liimliitele liimimisprotsessis rakendatava surve suurus ja ajaline kestvus, liimi viskoossus, liimikihi paksus, liimi viskoelastsed omadused ja kuivamiskahanemine [16]. Tavapäraselt kasutatakse kahekomponentset uretaanliimi või kuumtöödeldud liimi. Täpne liimmaterjali valik ja retsept sõltub liimitavatest materjalidest [26].

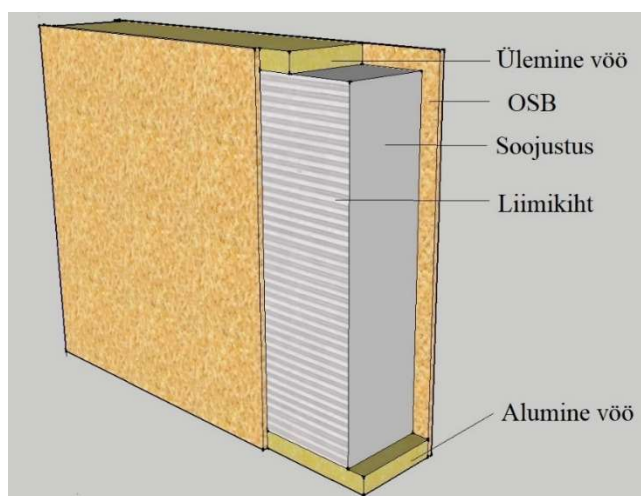
1.3.3. SIP-süsteemi kirjeldus

SIP-süsteemi konstrueerimine

SIP-süsteemil hoone ehitamine erineb paljuski tavapärasest puitkarkasshoone ehitamisest. SIP-paneelid valmistatakse tehasetingimustes ja transporditakse valmiskujul objektile. Kiire ja sujuva hoonekarbi montaaži tagamiseks tehakse tehases kogu võimalik eeltöö ära.

Vundament: SIP-hoone püstitamiseks sobib nii lint-, plaat- kui postvundament. Vundamendi juures on kõige olulisem jälgida mõõtude ja kõrguste tolerantse ± 5 mm. Hoone projektijärgseks ja kiireks püstitamiseks on vajalik jälgida vundamendi tolerantse, sest jäikade SIP-paneelidega on vundamendist tulenevaid hälbeid väga keeruline parandada. Tavaliselt eeldab see suurt ja ajamahukat parandustööd vundamendi juures või paneelide ümberlõikamist/modifitseerimist objektil või uute paneelide tootmist tehases [16].

Hoone püstitamist alustatakse vundamendile puidust alusvöö paigaldamisega. Puidust alusvöö ja vundamendi vahele paigaldatakse niiskuse kapillaartõusu vältimiseks rullmaterjalist niiskustõke. Sein soojustuse paksusega sama lai puidust vöö ankurdatakse metallist kinnitusvahenditega vundamendi külge. Sein lõpetatakse samamoodi ülemise vöö paigaldamisega. Vöö ülesandeks on seina kinnitamine vundamendi/põranda külge ja paneelide fikseerimine kogu perimeetri ulatuses (vt joonis 5). Samamoodi paigaldatakse puidust vööd ümber avatäidete perimeetri ning olenevalt hoone arhitektuursest lahendusest ja koormuste paiknemisest paigaldatakse avatäidete kohale, soojustuse kihti, ka puidust sillusetalad [28].

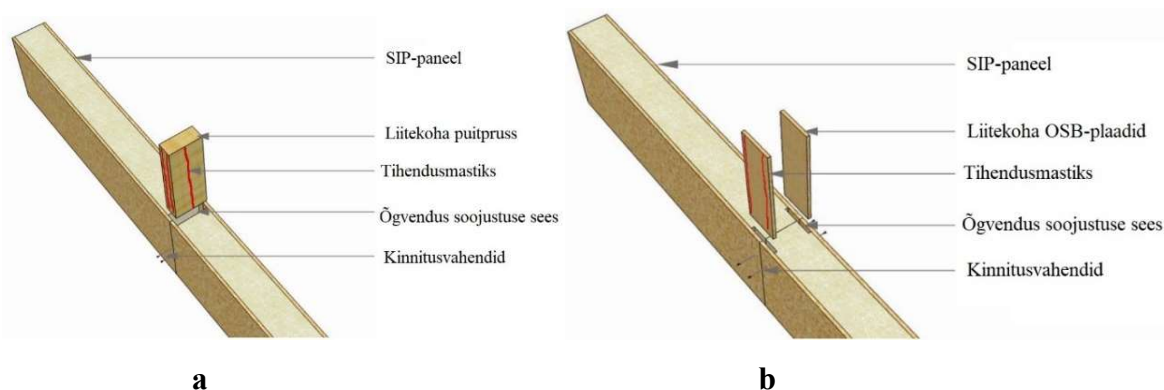


Joonis 5: SIP-seinapaneeli 3D vaade.

SIP-paneelide omavaheliste vertikaalsete ühenduste kinnitamiseks on neli võimalust:

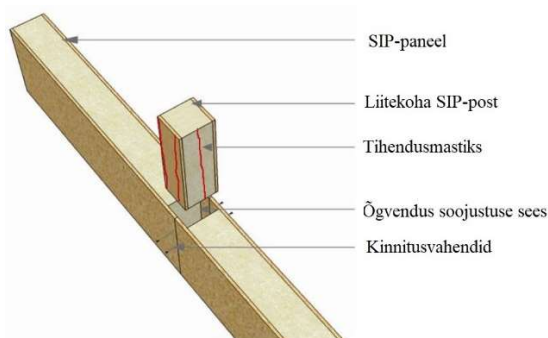
- a) puitprussiga [28];
- b) OSB-plaadiga [28];
- c) SIP-paneelist postiga [28];
- d) „cam-lock“ lukustussüsteem [24].

Esimese variandi (vt joonis 6. a) puhul paigaldatakse paneeli ühenduskohta soojustuskihiga samas paksuses üks või kaks puitprussi (olenevalt projektist). Prussi ja soojustuse vuuk täidetakse mastiksiga ning paneelid kinnitatakse kruvidega mõlemalt poolt prussi külge. Selle variandi miinuseks on prussist tekkiv külmasild.



Joonis 6: SIP-paneelide liitekohad [28]: a – liide puitprussiga; b – liide OSB-plaadiga.

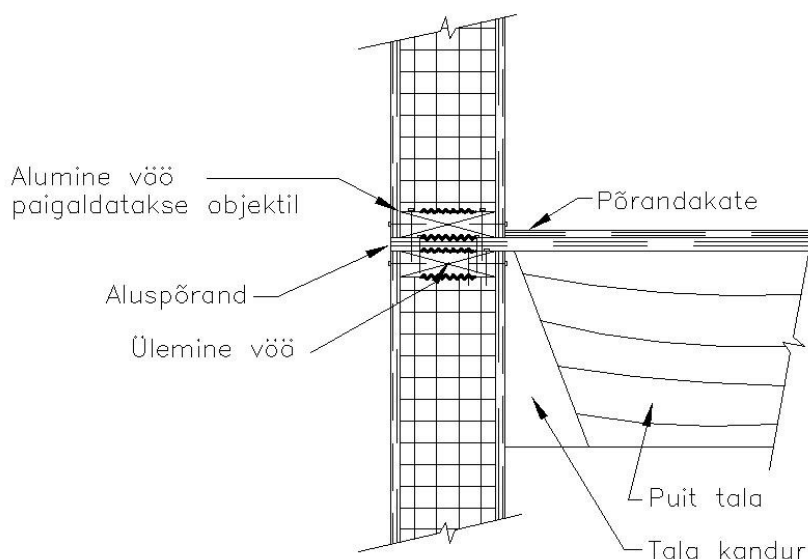
Teise variandi puhul (vt joonis 6. b) kinnitatakse paneelid teineteise külge paneelide sisekülgedele paigaldatavate OSB plaatidega. Lisa OSB paigaldamiseks õgvendatakse liitekohas asuvate paneelide soojustuse sisse OSB paigaldamiseks vajalikud õõnsused. Tekkinud liitekohad tihendatakse mastiksiga ja kinnitatakse väljastpoolt kruvidega. Kolmanda variandi (vt joonis 7) puhul kasutatakse SIP-paneeli soojustuskihiga samas mõõtmetes olevaid SIP-poste, mille ühendused tihendatakse mastiksiga ja kinnitatakse samamoodi väljastpoolt kruvidega [28].



Joonis 7: SIP-paneelide liitekoht SIP-postiga [28].

Neljanda variandi puhul on paneelide küljed varustatud spetsiaalse metallist lukustussüsteemiga, mis toimib tööpõhimõttelt on sarnane ukسلukule. Selliseid paneele saab vabalt lahti ja kokku monteerida. Seda varianti kasutatakse väga vähe ja enamasti teisaldatavate hoonete puhul. Katusepaneelide puhul kasutatakse erinevaid puittalasid (puittala, liimpuit, liimitud õhukeseseinalised talad jne) [24].

SIP-seinapaneelide montaaži alustatakse hoone nurgast. Seinaelementide montaaži puhul on ülioluline jälgida, et kõik paneelid oleksid paigaldatud projektijärgses asukohas ja sirgjooneliselt, sest tulenevalt paneelide jäikusest on ehitamise ebatäpsusest tingitud hälvete rihtimine väga keeruline. Seinapaneelide väliskoorikud peavad nii alt kui ülevalt olema toetatud täies pikkuses ja laiuses liituga konstruktsiooniga (paneeli väliskoorik töötab kandva elemendina). SIP-süsteemile iseloomulik vahelae sõlm kujutatud joonisel 8 [24].



Joonis 8: SIP vahelae sõlm [29].

Sõltuvalt hoone arhitektuursest lahendusest ja koormusskeemist võib tekkida vajadus paigaldada paneelide sisse lisaposte (punktkoormuse korral) või kombineerida SIP-süsteemi mõne teise konstruktsioonitüübiga (kõrgete ja avarate ruumide korral kasutatakse puit- ja teraskarkasse). Seinasisesed tugevduspostid paigaldatakse sarnaselt paneelide liitekohtadesse paigaldatavate ühenduselementidega. Puit- ja teraskarkassidega kombineerimisel töötab SIP-paneel pigem fassaadi- või katuseelemendina kui kandva elemendina. Seinte välis- ja sisenurkades, paneelid vabade otsade lõpetustes, teiste

tarinditega liitumisel ja muudes sarnastes kohtades kasutatakse liidete tugevdamiseks puitmaterjali. [28]

SIP-paneelidest hoone püstitamisel on väga oluline jälgida, et kõik liitekohad saaksid korralikult mastiksiga tihendatud ja hoone seestpoolt kaetud ka aurutõkke teibiga. Õhulekkest tekkiva kondensatsioonivee poolt põhjustatud kahjustuste likvideerimine on väga kulukas ja keerukas töö. Samuti peab montaaži käigus jälgime, et kõik konstruktsioonielemendi omavahel tihedalt kokku sobituksid ja erinevate konstruktsiooniosade vahele tühimikke ei jääks. Tekkinud tühimikud täidetakse kohapeal montaaživahuga. [28]

Kommunikatsioonide (elekter, vesi, ventilatsioon) paigaldamine tuleb hoone projekteerimise käigus põhjalikult läbi mõelda kuna objektile on muudatuste tegemine konstruktsioone rikkumata väga keeruline (kohati isegi võimatu). Elektri kaablid paigaldatakse kahel viisil: soojustuskihi sisse või hoone sisemisele küljele paigaldatava kipsikihi ja SIP-paneeli vahele. Kaablite soojustusekihi sisse paigaldamisel tehakse tootmisprotsessis paneelidesse kuuma traadiga elektri kaablite jaoks vertikaalsed ja horisontaalsed kanalid (tavapäraselt ca 40 mm diameetriga). Konstruktsioonipuidust ja tugevdustest läbiminekuks teostatakse ehitusobjektile. Harukarbid lõigatakse samuti paneelide sisse ja peale paigaldust tihendatakse montaaživahuga. Torustiku paigaldamist SIP-välisseintesse ei praktiseerita. [28]

SIP-paneelide kandevõime seisukohast on ülioluline, et paneelide välimiste kihtide terviklikkus oleks tagatud kogu hoone eluea vältel. SIP-paneelide välimiste kihtide kahjustumise korral väheneb kogu konstruktsiooni kandevõime, erinevalt puitkarkass-hoonest, kus seina lokaalsed kahjustused kogu tarindi kandevõimet nii oluliselt ei mõjuta. Põhiline kahjustuste põhjustaja on konstruktsiooni sattuv niiskus. Konstruktsioonide kaitseks niiskuse eest kaetakse hoone karp kohe peale püstitamist vee- ja tuulekindla auru läbilaskva kangaga. Samuti tuleb ehitustööde käigus kaitsta konstruktsiooni sademete ja liigniiskuse eest. Konstruktsioonide kaitseks siseruumidest tuleva niiskuse vastu kaetakse tarindid aurutõkke killega või teibitakse kõik konstruktsiooni liitekohad. Võimaliku tekkiva niiskuse väljakuivamiseks on SIP-hoonete puhul soovituslik kasutada tuulutatavaid fassaadi- ja katuselahendusi. [28]

Olenevalt hoone arhitektuurist ja paneelide mõõtmetest ning kaalust tuleb SIP-paneelidest hoone püstitamisel kasutada tõstemasinaid teleskooplaaduri või kraana näol, eriti just katuseepaneelide monteerimisel. Samuti kiirendab tõstevahendite kasutamine oluliselt ehitusprotsessi [26].

Kerge täidismaterjali tõttu isoleerivad SIP-paneelid paremini kõrgemaid helisid. Sellest tulenevalt ei soovitata SIP-paneele vahelagedes ilma lisa müratõkketa kasutada [24].

1.3.4. SIP-süsteemi tugevad ja nõrgad küljed

Tugevad küljed

Soojapidavus: võrreldes puitkarkasshoonega on SIP-hoone seintes rohkem soojustusmaterjali, sest seintes kasutatavate ja soojustuskihti läbivate puitpostide kogus on oluliselt väiksem või puudub üldse. Ja erinevalt puitkarkasshoonest puuduvad tehasetingimustes valmistatud ja jäiga isolatsioonimaterjaliga soojustatud SIP-paneelidel õhupiludest ja mikrokonveksioonist tingitud soojakaod. Brocki ülikooli 2000-2001. a teostatud uuringust nähtus, et projektijärgselt ligilähedaselt samas suuruses soojustakistusega seinakonstruktsioonide mõõtetulemused reaalses olukorras erinesid suurusjärgus 4 korda SIP-hoone kasuks. [30]

Õhupidavus: SIP-süsteemi soojusisolatsioon moodustab kogu majakarbi ulatuses ühtse tervikliku kihi, kus soojustust läbivaid konstruktsioonelemente on minimaalselt ja kõik liitekohad on tihendatud mastiksiga ning teibitud. Selline ehitustehnoloogia tagab oluliselt õhupidavama konstruktsiooni võrreldes puitkarkasshoonega, mis on tõestatud ka erinevate katsetuste käigus. Näiteks Brocki ülikoolis tehtud uuringus oli SIP-hoone rõhutesti tulemus ca 68% parem puithoone omast (vt pt 1.3.5).

Kerge ja tugev konstruktsioon: SIP-paneelidel on väga hea painde- ja nihkekandevõime ning SIP-paneel töötab komposiitelemendina. SIP-paneelide tugevusomadused on katsetatud ja sertifitseeritud erinevate sertifitseerimisorganisatsioonide poolt ning lisaks on SIP-paneelid läbinud edukalt n-ö päriselulisi katseid looduskatastroofide piirkondades (Kobe maavärin Jaapanis, orkaan Andrew jne) [22].

Ehitusaja ja raha kokkuvõtte: erinevate uuringute põhjal on kindlaks tehtud, et SIP-hoone püstitamisele kulub ca 30-50% vähem aega kui analoogse puitkarkasshoone püstitamisele [26]. Tulenevalt SIP-paneelide suurematest mõõtmetest (võrreldes puitkarkassiga) on hoone piirdetarindite ehitamise protsess kiirem, kergem ja töö teostamiseks kulub vähem tööjõudu, millest tulenevalt on ka tööjõukulud on madalamad. Uuringu järgi kulus SIP-paneelidest hoone piirdetarindite püstitamisele 2/3 vähema aega kui puitkarkasshoone oma [31].

Keskkonnasõbralik materjal: SIP-paneelide puhul on tehasetootega ja objektile tekkivate jäätmehulk on oluliselt väiksem. SIP-paneelide väliskoorikus kasutatav OSB-plaati toodetakse taastuvatest loodusressurssidest. Soojusmaterjalide tootmisprotsess on CFC/HCFC vaba ja negatiivne mõju maa osoonikihi puudub [22].

Puitmaterjali negatiivsed mõjud väiksemad: puitkarkasshoonega võrreldes on SIP-süsteemis kasutatav konstruktsioonipuidu kogus väiksem. Sellest tulenevalt on seinte soojusläbivus madalam ja vähem on ka puidu kuivamisest põhjustatud deformatsioone (tuvastatud 1 aasta peale hoone kasutusele võtmist teostatud ülevaatusel) [22].

Nõrgad küljed

Standardiseerimata materjal: puuduvad ühtsed paneelide projekteerimist, tootmist ja katsetamist reguleerivad standardid. Samas kolmandate osapoolte (teadusasutused, materjalide- ja paneelide tootjad) erinevates materjali- ja koormuskombinatsioonides laialdaselt analüüsitud ja katsetatud ning tunnustatud sobivaks konstruktsioonimaterjalina kasutamiseks [22].

Bioloogilised faktorid: niiske kliimaga piirkondades on hallitus ja puitkonstruktsioonide mädanemine tavaline nähtus. Niiskuskahjustused tulenevad otseselt ehituslikest vigadest: veelekked, õhulekked, vähene õhuvahetus või selle puudumine jne. Niiskuskahjustuste avastamisel tuleb konstruktsioonid avada kuni SIP-paneelini ja lasta niiskusel välja kuivada [24]. Lisaks ohustavad konstruktsioone ka puit- ja isolatsioonimaterjale söövad putukad. Putukatest põhjustatud kahjusid on raske avastada ja kõrvaldada [15]. Lahenduseks on materjalide töötlemine putukatõrje vahenditega [32].

Tulekindlus: tulekaitsevahendi lisamiseta on enamus SIP-paneelides kasutatavatest soojustusmaterjalidest süttivad v.a PIR. Tulekindluse tagamiseks kaetakse SIP-paneelid seestpoolt kipsplaadiga või tulekaitsevärviga. Kipsikihi paksus sõltub SIP-konstruktsioonist ja hoone asukohas kehtivatest normidest. Tsementkiudplaadiga SIP-paneelide puhul võib kipsikihi ära jätta juhul kui läbiviigud väliskoorikust on tihendatud tulekindla materjaliga. [28].

Temperatuuritundlikkus: SIP-paneelide puhul tuleb rääkida ka temperatuuritundlikkusest, mis mõjutab seina soojustusmaterjali ja liimliidet. OSB/EPS kombinatsiooniga SIP-paneeli maksimaalne temperatuur, mille ületamine kahjustab paneeli on 71 kraadi. Olenevalt materjali tootjast võib see natukene erineda, aga kindlasti peaks selle projekteerimise faasis kindlaks tegema. Madal temperatuurilävi võib saada kriitiliseks soojas kliimas kasutatavate katusepaneelide puhul. [28]

SIP-paneelide kestvus ajas: SIP-paneelide tootjad deklareerivad paneelide elueaks 60 aastat ja kuigi Ameerika Ühendriikides on SIP-hooned kasutusel olnud juba rohkem kui 50 aastat, siis tehnilise seisukorra hinnangul nii pikalt kasutuses olnud SIP-paneelide seisukorrale puudub [22].

Õhukvaliteet: tulenevalt õhupidavast hoonekarbist võib ebapiisava ventilatsiooni või selle puudumisel kannatada õhukvaliteet, mis omakorda võib hallituse tekkeni. SIP-hoone puhul peab hoone õhukvaliteedi tagamiseks paigaldama soojustagastusega ventilatsioonisüsteemi. [15]

Muudatus- ja parandustööd: SIP-süsteemi puhul on tegemist tehases toodetud tervikliku tootega, millele projektimuudatuste teostamine objektile on keeruline ja olenevalt muudatuse suurusest kohati ka ilma ehitusprotsessi katkestamata võimatu. Arhitektuurilist või konstruktiivset projekti puudutavate muudatuste teostamiseks tuleb tavaliselt uued paneelid toota. Samuti on keeruline teostada erinevaid paneelidega seotud parandustöid.

Hoone ehitus- ja kasutusloa saamine raskendatud: kuna tegemist on Euroopa regiooni ja elamuehituse mõistes mittetraditsioonilise materjaliga, siis võib ehitus ja kasutusloa saamisel SIP-süsteemil ehitatud hoonete puhul esineda komplikatsioone.

Teadmiste- ja kogemuste puudus: kuigi SIP-paneele on küllaldaselt uuritud on endiselt teemasid, mis on tähelepanu alt välja jäänud ja vajaksid eraldi analüüsimist:

- samaaegselt kolme erineva koormusega (vertikaaljõud, horisontaaljõud elemendi sihis ja horisontaaljõud elemendiga risti) koormuskombinatsiooni katsetamine;
- avade mõju seinaelementide kandevõimele;
- alalise koormuse mõju SIP-paneeli soojustusmaterjali deformatsioonile ja selle sõltuvus temperatuurist;
- SIP-paneelide omavaheliste vertikaalühenduste mõju paneelide tugevusomadustele;

Ehitushind: erinevate uuringute põhjal on SIP-süsteemil eluhoone ehitamine 2-20% kallim kui puitkarkasshoone ehitamine sõltudes nii hoone arhitektuurist, asukohast, tööjõukuludest, ehitusmaterjali hindadest. Samas mittelehoonete puhul on saadud 10% soodsam tulemus kui puitkarkassil. [26]

1.3.5. SIP-paneelide katsetused

SIP-paneelide tugevuskatsed

Erinevatel põhjustel ei ole senini ühtset SIP-paneelide arvutusjuhendit loodud ja hetkel toimub uurimis- ning arendustöö teadusasutuste ning paneelitootjate eestvedamisel. Mõningates arvutusolukordades saab teistest analoogseid materjale või olukordi käsitlevatest normidest kirjeldatud arvutusjuhendeid üle kanda SIP-süsteemile (näiteks EVS-EN 14509:2013. Isekandvad kahepoolsete katteplekkidega sändvitšpaneelid. Tööstuslikult valmistatud tooted. Spetsifikatsioonid.) [25]. SIP-paneelide mehaaniliste omaduste uurimiseks on erinevate teadusasutuste ja paneelitootjate poolt läbi viidud mitmeid tugevuskatseid: nihketugevus, survetugevus, tõmbetugevus, paindetugevus, roome jt. Katsete tulemusel koostatud koormustabelid ja tehnilised karakteristikud on aluseks hoone tarindite projekteerimisel [33]. Napier Ülikoolis läbiviidud katsetulemused kinnitavad, et SIP-paneeli erinevad osad (väliskiht, liimikiht ja isolatsioon) töötavad ühtse tervikliku komposiitmaterjalina [25].

Erinevate uuringute käigus on võrreldes puitkarkasshoonega saadud paremaid tugevusomadusi. Järgnevalt kirjeldatud näide ühest teadustööst SIP-paneel ja puitkarkass-

seina kohta. Arvutuslikult analüüsiti vertikaalselt koormatud erinevate konstruktsioonitüüpidega seinapaneelide kandevõimet. Võrdluses oli 4 erinevat paneelitüüpi: 2 SIP-paneeli ja 2 tüüpi puitkarkass-seina. Võrdluseks valiti kaks ligilähedase konstruktsioonipaksusega erinevat seinatüüpi: puitkarkass-sein ja SIP-paneel. SIP-paneelide kandevõime saadi tootjapoolsest koormustabelist ja puitkarkass-seina kandevõime arvutati uurimustöö käigus. SIP-paneelid kandevõime oli kõikides võrdluspositsioonides puitseina omast kõrgem. Analüüsi tulemused esitatud tabelis 4. Samas töös võrreldi ka ühtlaselt koormatud SIP-paneelist plaadi ja puitkarkass-elementi arvutuslikku kandevõimet ning ka selles võrdluses näitas SIP-paneel igas positsioonis (erinevad võrdluspaarid, erinev sille) paremaid tulemusi kui puitkarkass (erinevuse suurusjärg 4-40% sõltuvalt positsioonist). [33]

Tabel 4: Vertikaalse jõuga koormatud SIP- ja puitkarkass-sein arvutuslik kandevõime [33]

| Kõrgus mm kN/m | Puit 100mm: pruss 50x100mm s. 400 mm kN/m | SIP 89mm: OSB 11mm, EPS 67mm + OSB 11mm kN/m | Puit 150mm: pruss 50x150mm s. 400 mm kN/m | SIP 140mm: OSB 11mm, EPS 128mm + OSB 11mm kN/m |
|----------------------|---|--|--|--|
| 2420 | 22,72 | 40,13 | 54,32 | 58,38 |
| 3480 | 15,88 | 36,48 | 46,28 | 51,08 |
| 3658 | 11,47 | 29,19 | 37,55 | 43,78 |
| 4267 | 8,60 | - | 29,95 | 40,13 |
| 4877 | 6,67 | - | 24,02 | 36,48 |

Päriseluliste tugevuskatsete näidetena võib välja tuua mõned kirjeldused looduskatastroofi piirkondadest. 1995. a Kobes (Jaapan) toimunud 6.9 magnituudilise maavärina käigus hävis tervete kvartalite kaupa hooneid, samas kui SIP konstruktsioonid jäid kõik püsima [34]. Teine näide on Clermontis (Georgia, USA) märtsis 1998. a toimunud tornaado kahjustustest. Tornaado murdis puid, kiskus hoonetelt katuseid ja purustas ligemale 25 hoonet, aga SIP-hoonetel konstruktsioonide kahjustused puudusid [14].

SIP-paneelide puhul on kindlasti üks olulisemaid ja vähem uuritumaid omadusi alalisest koormusest põhjustatud deformatsioonid. Lühiajaliste katsetuste puhul on deformatsioon olnud minimaalne ja peale koormuse eemaldamist taastunud. Alaliste koormuste poolt põhjustatud deformatsioone ja nende suuruse prognoosimise meetoodika on vähekaasitud. SIP-paneeli soojusisolatsioon on viskoelastne materjal, mille deformatsioon ajas järk-järgult alalise koormuse ja temperatuuri tõusu mõjul suureneb (roome). Lisaks mõjutavad soojutuskilhi deformatsioone veel koormuse suurus, soojusmaterjali tüüp ja tehnilised

omadused, ümbritseva keskkonna temperatuur ja niiskustase. Katsetulemused näitavad, et jäigemad on tarindid, kus SIP-paneelide omavahelised ühendused on tugevdatud prussidega. [22]

Kokkuvõtlikult võib öelda, et SIP-paneele on piisavalt uuritud ja katsetatud ennustamaks paneelide käitumist erinevate materjalide- ja koormuskombinatsioonide korral ning OSB-plaadiga kaetud SIP-paneelid on sobivad kasutamiseks hoone piirdetarindites [22].

ORNL SIP-hoone soojuslähivuse ja õhupidavuse uuring

2002. aastal viidi Oak Ridge Rahuvusvahelises Laboratooriumis (ORNL – *Oak Ridge National Laboratory*) läbi katse, kus uuriti kliimakambris kahe erineva katsemaja energiakulu ja seinte piirdetarindite õhupidavust. Esimese etapis ehitati SIP-paneelidest katsemaja, teostati mõõdistused ja peale seda piirdetarindid (seinad ja lagi) lammutati. Teises etapis ehitati sama põrandakonstruktsiooni peale puitkarkassil maja ja teostati samad mõõdistused [35].

Kui katsemajade seina- ja laekonstruktsioonide erinevus kõrvale jätta, siis muus osas olid hooned ja kliimatingimused samasugused. Katsemajade ehitajatele anti juhtnöörid ehitada samu meetodeid ja kvaliteeti kasutades nagu nad igapäevaselt ehitusobjektile teevad. Kummagi hoone puhul ei kasutatud auru- ega tuuletõkke kihte (katsesimulaatoris tuule mõju puudus). Hoone seinad ja laed viimistleti seestpoolt kipsplaadiga ja vuugid kaeti ühe pahtlikihiga [35].

Katse lähteandmed olid järgmised [35]:

- katsemaja sisemõõtmed (pikkus x laius x kõrgus): 3330 x 3330 x 2300 mm;
- SIP-seina konstruktsioon: 12 mm OSB + 89 mm EPS + 12 mm OSB ($U = 0,415$ W/m²K, soojustuse sektsioon);
- SIP-lae konstruktsioon: 12 mm OSB + 89 mm EPS + 12 mm OSB ($U = 0,21$ W/m²K, soojustuse sektsioon);
- puitkarkass-seina ja lae konstruktsioon: pruss 50x150 mm s. 600, karkasi vahel klaasvill ($U = 0,30$ W/m²K, soojustuse sektsioon);
- Avatäited: mõlemal samaväärsed;
- Temperatuur:

- välistemperatuur 0 °C;
- temperatuur põranda all 10 °C;
- sisetemperatuur 21 °C.

Läbiviidud katse parameetrite juures oli vaadeldud perioodil SIP-katsemaja küttekulu 9,2% väiksem kui puitkarkasshoonel (tulemused vastavalt 768W ja 845W vaatlusperioodi kohta). Katsemajade rõhutesti tulemused olid jahmatavad: 50Pa juures mõõdetud rõhuerinevuse tulemused erinesid SIP- ja puitkarkasshoone puhul tervel 14 korda, mis kinnitab ilmekalt korrektselt ehitatud SIP-süsteemil majakarbi õhupidavust [35].

ORNL SIP-paneeli ja puitkarkass-seina võrdlus „kuumakasti“ meetodil

Oak Ridge Rahvusvahelises Laboratooriumis uuriti 1999. aastal kuumakasti (*hot-box testing*) meetodil SIP-paneelist seinaelemendi ja puitkarkass-seina soojustakistusi. Võrdluses oli kokku 4 erinevat tüüpi seinakonstruktsiooni [36]:

- Puit 1: puitkarkass-sein: pruss 50x100 mm s. 400, karkasis vahel klaasvill;
- Puit 2: puitkarkass-sein: pruss 50x100 mm s. 600, karkassi vahel klaasvill;
- Puit 3: puitkarkass-sein: pruss 50x150 mm s. 600, karkassi vahel klaasvill;
- SIP 1: SIP-seinakonstruktsioon: 12 mm OSB + 89 mm EPS + 12 mm OSB.

Katsetulemused on toodud tabelis 5. Mõlemad soojustakistused (soojustuse sektsioonis ja kogu elemendi oma) on määratud katseliselt *hot-box* meetodil [36].

Tabel 5: ORNL poolt kuumakasti meetodil mõõdetud sein soojustuse sektsiooni ja kogu sein elemendi soojustakistus R [36].

| Konstr. Tüüp | R soojustuse sektsioonis (m ² K)/W | R kogu sein (m ² K)/W | Erinevus % |
|--------------|---|----------------------------------|------------|
| Puit 1 | 1,86 | 1,69 | 10,1% |
| Puit 2 | 1,91 | 1,73 | 10,4% |
| Puit 3 | 2,88 | 2,41 | 19,5% |
| SIP 1 | 2,67 | 2,48 | 7,7% |

Tabelist 5 nähtub, et SIP-paneeli soojustuse sektsiooni ja kogu sein soojustakistuse erinevus on väiksem kui puitkarkass-seinal. Tulemuste järgi on SIP-seina soojustakistus oluliselt

parem (olenevalt karkassi sammust 40% ja 44%), kui sama kihipaksusega puitkarkass-seina oma, olles ligilähedane (erinevus 8% SIP kahjuks) 50 mm paksema soojustusega puitkarkass-seina („Puit 3“) soojustakistusele [36].

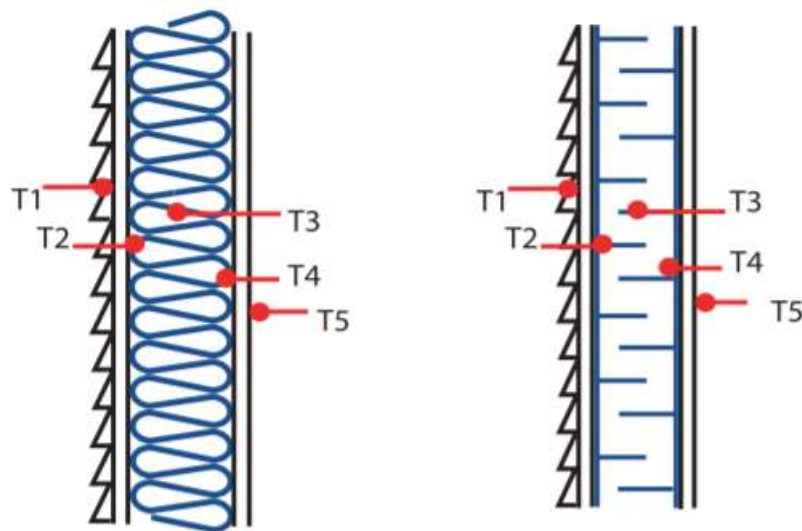
Brocki ülikooli uuring

Ameerika Ühendriikides asuvas Brocki Ülikoolis teostati uurimustöö, kus võrreldi kahe analoogse hoone soojustehnilisi omadusi üks hoone oli ehitatud puitkarkassil ja teine SIP-süsteemil. Kõik hoone soojapidavust mõjutavad omadused olid samaväärsed: sama arhitektuurne projekt, asukoht teineteise naabruses ja sama paiknemine ilmakaarte suhtes. Hooned ehitati Ontario Ehitusstandardile vastavalt ja sama meeskonna poolt, teadmata, et tegemist on katseobjektiga. Puitkarkasshoone soojustati 150 mm kivivillaga (seina paksus 152,44 mm ja soojustakistus $R=3,52(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$), SIP-süsteemil hoone polüstüreeniga (seina paksus 114 mm ja soojustakistus $R=2,99(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$). [30]

Kuna tegemist oli rendimajadega, siis ainukene erinevus oli maja inimestega asustatuse perioodides. Katse periood kestis kokku 12 kuud, ajavahemikus veebruar 2000. a kuni jaanuar 2001. Katsemajade soojapidavuse uurimisel kasutati kolme meetodit: termograafiline uuring, piirete õhupidavuse mõõtmine ja tunnise intervalliga temperatuuri mõõdistamine [30].

Termograafiline uuring teostati märtsikuus välistemperatuuril -10.5 kraadi juures. Termograafilisest uuringust nähtus, et puitkarkassi soojustamisel kasutatud materjali soojapidavus oli 5 korda väiksem arvutuslikust väärtusest. SIP süsteemi puhul oli arvutusliku ja katselise soojapidavuse erinevus marginaalne.. Puitkarkasshoone puhul olid põhilised külmasillad karkassielementide lõikes ja nende ümbruses võis täheldada õhulekke kohti. SIP süsteemi puhul ilmnesid külmasilmad ainult hoone välisnurkades. Termograafilisel teel määratud tarindi soojapidavus on siiski pigem hinnanguline kuna keskkonnatingimused mõjutavad mõõtmistulemust oluliselt. [30]

Seina temperatuurirežiimi mõõdistamiseks paigaldati mõlemale hoonele seinale lõikes 5 temperatuuri andurit ja mõõtmistulemisi salvestati 1-tunnise intervalliga. Temperatuuriandurite paiknemine konstruktsiooni kirjeldatud joonisel 9.



Joonis 9: Seina temperatuuriandurite paiknemise skeem [30]: vasakul puitkarkass-sein, paremal SIP-paneel. Seinte andurid vastavalt: T1. seina välispind; T2. soojustuse välispind; T3. seina keskpunkt; T4. soojustuse sisepind; T5. seina sisepind.

Talvekuudel kõikus puitkarkassi seina sisetemperatuur samas trendis ja vahemikus välisõhu temperatuuriga, samal ajal püsis SIP-süsteemi temperatuur stabiilsena ja muutumisvahemik oli ca 5 korda väiksem. Jaanuarikuu 3. anduri keskmine temperatuur puitkarkassil 1,95 kraadi ja SIP-süsteemil 15,61 kraadi. Soojustuse sise- ja välispinna temperatuuri vahe erinevus oli katsemajade puhul peaaegu kahekordne: terve katseperioodi keskmine temperatuur SIP-süsteemil 6,51 kraadi ja puitkarkassil 12,31 kraadi [30].

Energiatõhususe seisukohalt on hoone piirde õhupidavus väga oluline tegur. Piirete õhupidavuse määramiseks teostati mõlemale katsemajale test 50 Pa alarõhu juures. Õhuvahetuvus 50 Pa juures SIP süsteemil 1,55 1/h ja puitkarkassil 2,6 1/h – erinevus 68% puitkarkassi kahjuks [30].

Kõnealuse katse puhul näitas SIP süsteemil ehitatud maja märgatavalt paremaid tulemusi kõigil kolmel mõõtmisalal. Kahjuks on selliseid reaalsetel objektidel korraldatud katseid väga, aga huvi nende järele on järjest kasvav [30].

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Võrdlushoone ja kasutatud materjalide kirjeldus

2.1.1. Võrdlushoone kirjeldus ja tehnilised andmed

Puitkarkass-seina ja SIP-paneelide võrdlemiseks on koostatud võrdlushoone arhitektuurne projekt. Võrdlushoone (vt joonis 10) on klassikaline, lihtsa arhitektuuriga, viilkatusega 1,5 kordne väikeelamu. Hoonel on keskmise suurusega aknad, mis moodustavad ca 11% fassaadipinnast. Hoone suurus on valitud Statistikaameti viimase 5 aasta jooksul kasutusloa saanud väikeelamute eluruumide pindala andmete põhjal.



Joonis 10: Võrdlushoone 3D mudel.

Võrdlushoone tehnilised andmed:

ehituslune pind: 139,2 m²;

suletud netopind: 159 m² (I-korrus 88,5 m², II-korrus 70,5 m²);

hoone mõõtmed (laius x pikkus x kõrgus): 9,4 x 11,35 x 7,5 m;

korruselisus: 1,5 korrust;

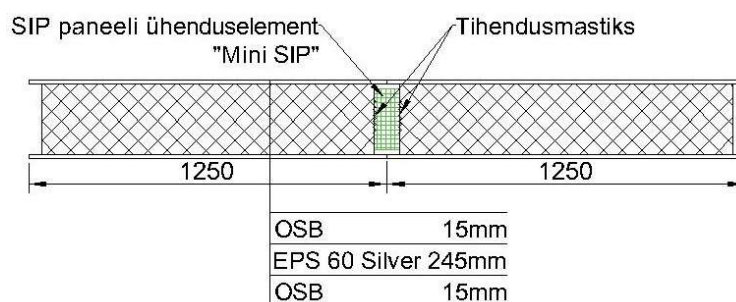
korruse kõrgus: I – korrus 2,44 m, II- korrus 3,58 m;
akende osakaal fassaadipinnast: 11%;
katuse kalle: 30°.

2.1.2. Materjalide valik ja konstruktsioonide dimensioneerimine

Hoone projekteerimisel ja konstruktsioonide dimensioneerimisel on lähtutud kaubanduses kättesaadavate ehitusmaterjalide parameetritest ja energiatõhususe miinimumnõuetes piirdetarinditele esitatud nõuetest.

SIP-hoone

SIP-paneelide soojustusmaterjalina on kasutatud EPS 60 Silver polüstüreenplaate. Võrrelduna EPS 60-ga on EPS 60 Silver soojuseri juhtivus oluliselt parem (vastavalt 0,032 W/(m²K) ja 0,039 W/(m²K)) ja materjali maksumus soojusläbivuse ühiku kohta ca 6% soodsam. Paneeli paksuse määramisel tuleb lähtuda levinumatest puitmaterjalide mõõtmetest kuna SIP-süsteemi puhul kasutatakse tarindite liitekohtade tugevdamiseks just puitmaterjali. Puitmaterjali kättesaadavust ja seina soojusläbivust arvestades langeb valik 45x245 mm puitprussi kasuks, millest tulenevalt saab SIP-seinapaneeli soojustuse paksuseks 245 mm (vt joonis 11). Seina keskel asuvates vertikaalsetes SIP-paneelide omavahelistes ühendusvuukides on võimalik kasutada ka nn „mini-SIP“ paneeli.

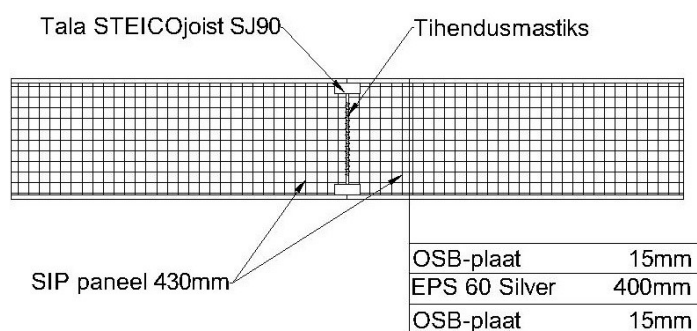


Joonis 11: SIP-paneelide seina ristlõige ja omavaheline ühendus.

SIP-paneelide kandva välimise kihina kasutatakse tavapäraselt OSB plaati. Võrreldes teiste ehitusplaatidega, räägib OSB-plaadi kasuks soodne hinnatase ja kerge töödeldavus. Lisaks on OSB plaadist koostatud paneelid enim kasutatud SIP-paneeli tüüp ja seetõttu on selle paneelitüübi kohta ka kõige rohkem teadus- ja kogemuspõhist teavet. Meie regioonis levinud OSB plaadi tehase mõõtmed on 1250x2500 mm, mis määrab ka SIP-paneeli võimaliku

suurima mõõtme. OSB plaadi paksuseks valime 15mm, lähtudes teistest Euroopa turul tegutsevatest SIP-paneelide tootjate toodete spetsifikatsioonidest.

Katusepaneelide madalama soojusläbivuse saavutamiseks on SIP-paneeli soojustuskihi paksust suurendatud 400 mm. Sarnaselt seinapaneeliga on katusepaneel mõlemalt poolelt kaetud 15mm OSB plaadiga. Katusepaneelide liitekohtade tugevdamiseks, paneelide kinnitamiseks ja katusekoormuse kandmiseks paigaldatakse paneelide pikivuukidesse STEICOjoist SJ90 puidust I-talad (vt joonis 12). Alternatiivina võib kasutada ka puitu või kihilist liimpuitu.



Joonis 12: SIP-katusepaneeli konstruktsiooni lõige.

Puitkarkasshoone

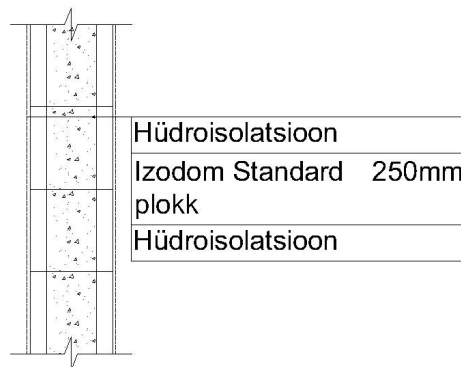
Puitkarkasshoone seina- ja katusetarindite soojustusmaterjal on klaasikiududest mineraalvill Knauf Naturboard 032, mille soojuserijuhtivus on sama EPS 60 Silver omaga s.o 0,032 W/(m²K). Katusekandjateks 50x400 mm (s. 600 mm) Steico Ultralam kihilisest liimpuidust talad. Muus osas on standardsed puitkarkasshoone lahendused, mida on täpsemalt käsitletud tarinditüüpide kirjelduste all.

2.1.3. Võrdlushoone tarinditüüpide kirjeldused

Vundament

Võrreldavate tulemuste saamiseks on mõlemad hooned projekteeritud samasugusele vundamendilahendusele. Vundament rajatakse 300 mm paksusele tihendatud killustikkihile. Izodom Standard plokkidest rajatav lintvundament toetub 250x400 mm mõõtmetega r/b vundamenditaldmikule. Izodom Standard toote näol on tegemist ICF (*insulated concrete formwork* – isoleeritud raketisplokid) plokkidega. Plokkide sisemise ja välimise kihi

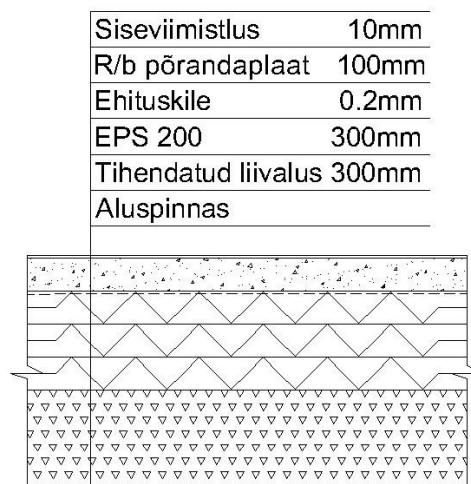
moodustab Neopor vahtplast (50 mm mõlemal pool) ning keskmine (150 mm laiune) osa täidetakse betooniga. Vundamendi taldmiku alumine pind rajatakse 1200 mm sügavusele maapinnast. Vundamendi konstruktsioon kirjeldatud joonisel 13.



Joonis 13: Vundamendi konstruktsioonikihid ja nende paksused.

Pinnasel põrand

Samaväärsete lähtetingimuste loomiseks on mõlemale hoonele projekteeritud samasuguste konstruktsioonikihtidega põrand (vt joonis 14). Kasvupinnas eemaldatakse täies mahus ja põranda alla rajatakse tihendatud liivalus paksusega 300 mm. Killustikalusele paigaldatakse kolmes kihis EPS 200 100 mm paksused vahtpolüstüreenplaadid, PE-kile ning armeeritud (5/5/150/150) betoonist põrandaplaat paksusega 100 mm.

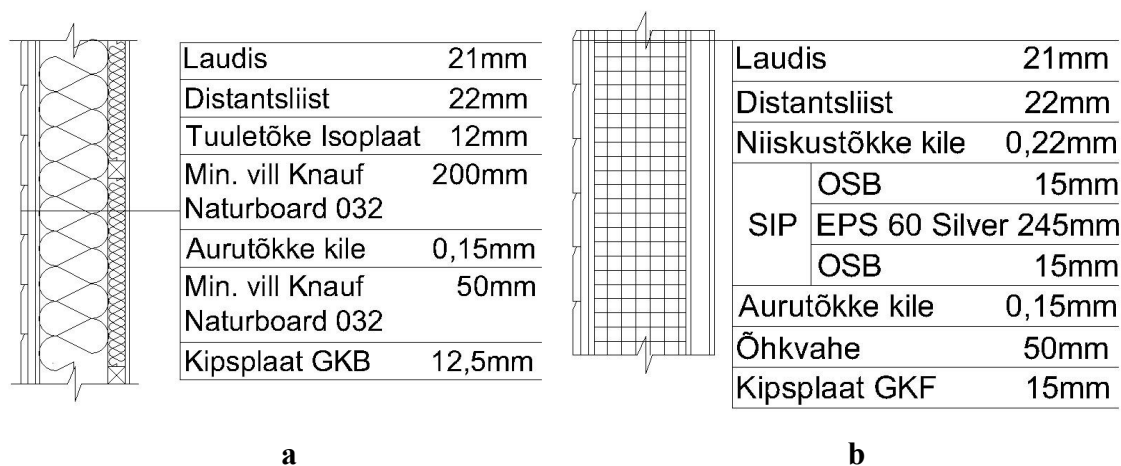


Joonis 14: Pinnasel põranda konstruktsioonikihid ja nende paksused.

Välisseinad

SIP-hoone välisseinteks on 275 mm paksused SIP-paneelid. SIP-paneeli moodustab 245 mm paksune EPS 60 Silver soojustuskiht, mis on mõlemalt küljelt lamineeritud 15 mm

paksuse OSB puitlaastplaadiga. Paneelide ühenduskohtades kasutatakse 90x230 mm ristlõikega SIP-postidest ühendusprofiili („mini-SIP“: OSB 15 mm + EPS 60 Silver 200 mm + OSB 15mm). Seinte nurkades, avatäidete perimeetril, alumistes ja ülemistes vöödes ning liitumistel teiste tarinditega kasutatakse puitprusse, mis paigaldatakse soojustuse kihti OSB plaatide vahele. Majakarp kaetakse väljastpoolt auru läbilaskva niiskustõkkekilega. Tuulutusvahe tekitamiseks paigaldatakse niiskustõkke kile peale 22x50 mm puitroovid. Hoone fassaad kaetakse 21x145 mm peensaetud laudisega. SIP-hoone välisseina konstruktsioon joonisel 15.b.



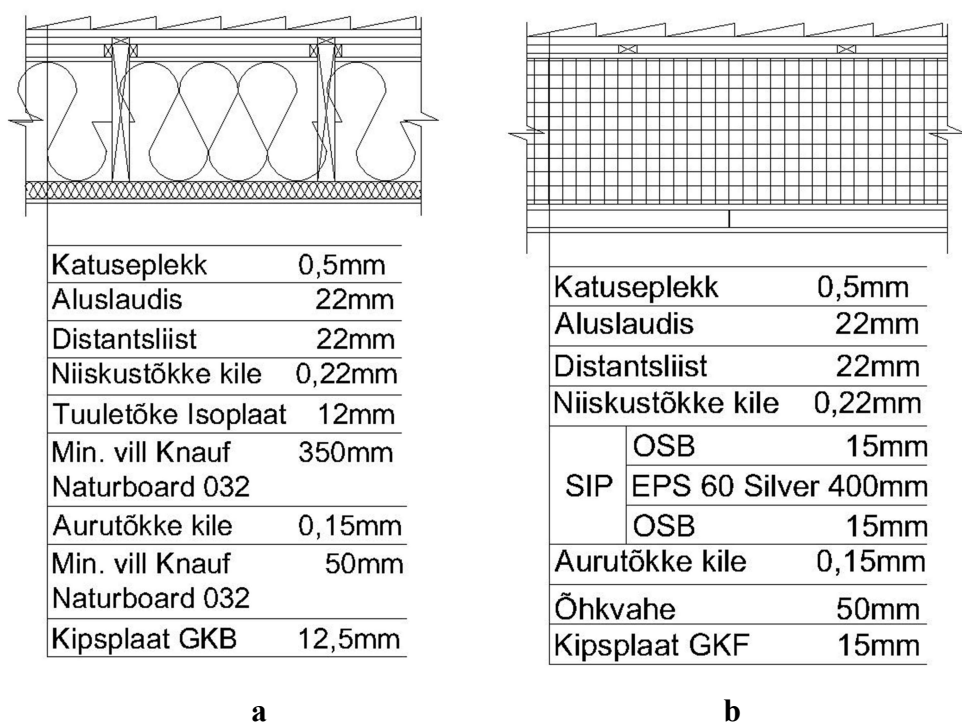
Joonis 15: Välisseinte konstruktsioonikihid ja nende paksused: a – puitkarkasshoone; b – SIP hoone.

Puitkarkasshoone väliseinad rajatakse 50x200 mm (s. 600) puitprussidest. Prusside vahele paigaldatakse kahes kihis 100 mm paksused Knauf Naturboard 032 mineraalvillaplaadid. Seina sisemine pool kaetakse aurutõkkekilega (vuukide ülekate min. 150 mm, vuugid ja võimalikud läbiviigud teibitud). Aurutõkke peale paigaldatakse 600 mm sammuga 50x50 mm horisontaalsed roovid, mille vahel on soojustuseks mineraalvill Knauf Naturboard 032. Roovid kaetakse kipsplaadiga GKB 12,5 mm. Soojustuskihi läbipuhumise vältimiseks paigaldatakse seina välimisele küljele 12 mm paksune Isoplaat tuuletõkkeplaat. Tuuletõkkeplaat kinnitatakse 22x50 mm puitrooviga, millega tagatakse vajalik tuulutusvahe. Hoone fassaad kaetakse 21x145 mm peensaetud laudisega. Puithoone seinakonstruktsioon joonisel 15. a.

Katus

SIP-hoone katuseks on 430 mm SIP-paneelid. SIP-katusepaneeli moodustab 400 mm paksune EPS 60 Silver soojustuskiht, mis on mõlemalt küljelt lamineeritud 15mm paksuse

OSB puitlaastplaadiga. Paneelide ühenduskohad tugevdatakse ja seotakse omavahel STEICOjoist SJ 90 puittaladega. Katusepaneelid kaetakse auru läbilaskva niiskustõkkega. Niiskustõkke peale paigaldatakse 22x50 mm distantisliist (s. 600 mm) ja selle peale omakorda 22x100 mm puitmaterjalist aluslaudis. Katus kaetakse katuseplekiga. SIP katusekonstruktsioon joonisel 16. b.



Joonis 16: Katuste konstruktsioonikihid ja nende paksused: a – puitkarkasshoone; b – SIP hoone.

Puitkarkass hoone katusekandjateks on 50x400 mm (s. 600mm) Steico Ultralam kihilisest liimpuidust talad. Talade vahele paigaldatakse 350 mm mineraalvilla Knauf Naturboard 032m. Vill kaetakse väljastpoolt Isoplaat 12mm tuuletõkkeplaadiga, mis paigaldatakse talade vahele, liimpuittalade külgedele kinnitatavate liistude külge. Liimpuittalade peale paigaldatakse niiskustõkke kile, mis kinnitatakse 22x50mm (s. 600mm) distantisliistudega. Distantisliistu peale paigaldatakse 22x100 mm puitmaterjalist aluslaudis. Katus kaetakse katuseplekiga. Puitkarkasshoone katusekonstruktsioon joonisel 16.a.

Avatäited

Mõlemal hoonel on puidust aknad (0,95 W/m²K) ja puidust välisuksed (1,1 W/m²K).

Tabelis 6 on kirjeldatud mõlema hoone piirdetarindites kasutatud materjalide tehnilised omadused.

Tabel 6: Soojapidavus ja niiskustehnilistes arvutustes kasutatud materjalide omadused

| Materjal | Soojuseri juhtivus λ , W/(m·K) | Difusioonitakistus- konstant μ | Aurutakistus Sd, m |
|-----------------------------------|---|---------------------------------------|-----------------------|
| Betoon | 2,000 ¹⁾ | 130 ¹⁾ | |
| EPS 200 | 0,033 ²⁾ | 70 ²⁾ | |
| EPS 60 Silver | 0,032 ²⁾ | 30 ²⁾ | |
| Izodom King plokk | 0,053 ³⁾ | | |
| Niiskuskindlam vineer | 0,170 ¹⁾ | 220 ¹⁾ | |
| OSB | 0,130 ¹⁾ | 50 ¹⁾ | |
| Puit | 0,130 ¹⁾ | 40 ¹⁾ | |
| Klaas | 1,000 ¹⁾ | 100000000 ¹⁾ | |
| Kipsplaat | 0,250 ¹⁾ | 10 ¹⁾ | |
| Montaazivaht | 0,100 ¹⁾ | 60 ¹⁾ | |
| Pinnas | 2,000 ¹⁾ | 50 ¹⁾ | |
| Tuuletõkkeplaat-Isoplaat | 0,049 ⁴⁾ | 7 ⁴⁾ | |
| Knauf Naturboard 32 | 0,032 ⁵⁾ | 1 ⁵⁾ | |
| Niiskustõkkekile Tyvek Solid | - | 136 ⁶⁾ | 0,15 ⁶⁾ |
| Aurutõke (polüetüleenkile 0,15mm) | - | 53333 ¹⁾ | 8 ¹⁾ |

Märkused:

- 1) EVS-EN ISO 10456:2008/AC:2009. Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid.
- 2) Tootja: Reideni Plaat AS. Allikas: <https://reideniplaat.ee/sertifikaadid/>.
- 3) Tootja: Thermomaja OÜ. Allikas: <http://thermomaja.ee/images/pdf/ETA-2017.pdf>.
- 4) Tootja: Skano Group AS. Allikas: <http://fibreboard.skano.com/et/tooted/isoplaat>.
- 5) Tootja: Knauf Grupp. Allikas: <http://www.knaufinsulation.ee/et/klaasvill>.
- 6) Tootja: DuPont. Allikas: <https://www.isover.cz/en/products/tyvek-solid>.

2.2. Hoone välispiirete soojuslähivuse arvutus

Piirdetarindite soojuslähivuse arvutusmeetod põhineb materjalide ja toodete soojuseri juhtivuse või soojustakistuse arvutusväärtusel. Meetodit saab rakendada selliste tarindite või tarindiosade puhul, mis koosnevad soojuslikult homogeenestest kihtidest (mille

seas võivas olla õhkvaheed) või soojuslikult mittehomogeensetest kihtidest (välja arvatud juhtumid, kus soojustuskihis on oluline külmasild) [37].

Hoonete välispiirded peavad olema pikaajaliselt õhkupidavad ja piisavalt soojustatud. Otstarbeka soojustuse määramisel lähtutakse hoone energiatõhususe nõuetest, ruumide soojuslikust mugavusest ning hallituse ja kondensaadi vältimisest külmasildadel, sisepindadel ja tarindites. Piirete soojuslähivus arvutatakse standardi EVS-EN ISO 6946 järgi [9].

Piirete soojuslähivuse arvutusmeetodi põhimõtted on järgmised [9]:

- arvutatakse piirdetarindi iga soojuslikult homogeense kihi soojustakistus;
- määratakse üksikute kihtide ja pindade soojustakistuste summeerimisel piirdetarindi kogu soojustakistus;
- arvutatakse piirde soojuslähivus, mida korrigeeritakse, arvestades mehaaniliste kinnitite mõju, sademete mõju pööratud katustele, soojustuse õhuerijuhtivuse mõju.

Piirde soojuslähivus, U , $W/(m^2 \cdot K)$ arvutatakse valemiga (1) ümardatuna kahe kohani peale koma [9]:

$$U = \frac{1}{R_{tot}}, \quad (1)$$

kus U on piirde soojuslähivus $W/(m^2 \cdot K)$;

R_{tot} - piirde kogusoojustakistus $(m^2 \cdot K)/W$.

Soojuslikult homogeensetest kihtidest tarindi kogusoojustakistus R_{tot} , $(m^2 \cdot K)/W$, leitakse valemiga (2) [9]:

$$R_{tot} = R_{si} + R_l + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (2)$$

kus R_{si} on piirde sisepinna soojustakistus $(m^2 \cdot K)/W$, vt tabel 7;

R_l, R_2 - iga materjalikihi arvutuslik soojustakistus $(m^2 \cdot K)/W$;

R_{se} - piirde välispinna soojustakistus $(m^2 \cdot K)/W$, vt tabel 7.

Tabel 7: Piirde pindade soojustakistused piirdetarindi soojuslähivuse arvutamisel [9]

| | Üles (lagi) (m ² ·K)/W | Horisontaalne (sein) (m ² ·K)/W | Alla (põrand) (m ² ·K)/W |
|----------|--------------------------------------|--|--|
| R_{si} | 0,1 | 0,13 | 0,17 |
| R_{se} | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Soojuslikult homogeenise materjalikihi arvutuslik soojustakistus, R , (m²·K)/W, arvutatakse valemiga (3) [9]:

$$R = \frac{d}{\lambda_U}, \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W,} \quad (3)$$

kus d on materjalikihi paksus, m;

λ_U - materjali soojuserijuhtivus, W/(m·K).

Mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistus, R_{tot} , (m²·K)/W arvutatakse valemiga (4) ja ümardatakse kahe kohani pärast koma [9]:

$$R_{tot} = \frac{R_{tot;upper} + R_{tot;lower}}{2}, \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} \quad (4)$$

kus:

R'_T - mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga risti olevaid seksioone), (m²·K)/W;

R''_T - mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse alumine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga paralleelselt olevaid kihte), (m²·K)/W.

Kogusoojustakistuse ülemise piirväärtuse ja alumise piirväärtuse arvutamiseks tuleb piirdetarind tükeldada soojuslikult homogeenseteks seksioonideks ja kihtideks [9].

Mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus R'_T , (m²·K)/W, arvutatakse piirdetarindi pinnaga risti olevate seksioonide soojuslähivuste kaalutud keskmise summana, eeldades ühemõõtmelist soojuslevi valemi (5) järgi [9].

$$R_{tot;upper} = \frac{\sum A}{\frac{A_a}{R_{tot;a}} + \frac{A_b}{R_{tot;b}} + \dots + \frac{A_n}{R_{tot;n}}}, \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W} \quad (5)$$

kus A_a, \dots, A_n - piirde üksikute seksioonide osapindalad (osakaalud), m²;

$R_{tot;a}, \dots, R_{tot;n}$ - piirde üksikute seksioonide soojustakistused, mis arvutatakse vastavalt valemile, (m²·K)/W (2).

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus $R''_{tot;lower}$, $(m^2 \cdot K)/W$, arvutatakse piirdetarindi pinnaga paralleelselt olevate kihtide ühemõõtmeliste soojusvoogude summana vastavalt valemile (6) [9].

$$R_{tot;lower}'' = R_{si} + R_l + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, (m^2 \cdot K)/W \quad (6)$$

kus R_{si} - piirde sisepinna soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$;
 R_l, R_x, R_n - iga kihi soojustakistus, mis arvutatakse vastavalt valemile (3) (soojuslikult homogeenne kiht) või vastavalt valemile (7) (soojuslikult mittehomogeenne kiht), $(m^2 \cdot K)/W$;
 R_{se} - piirde välispinna soojustakistus, $(m^2 \cdot K)/W$.

$$R_x = \frac{\sum A_x}{\frac{A_{xa}}{R_{tot;xa}} + \frac{A_{xb}}{R_{tot;xb}} + \dots + \frac{A_{xn}}{R_{tot;xn}}}, (m^2 \cdot K)/W \quad (7)$$

kus A_{xa}, \dots, A_{xn} - mittehomogeense kihi üksikute osade osapindalad (osakaalud), m^2 ;
 R_{xa}, \dots, R_{xn} - mittehomogeense kihi üksikute osade soojustakistused, $(m^2 \cdot K)/W$, mis arvutatakse vastavalt valemile (3).

Alternatiivse meetodina võib kasutada ka ekvivalentset soojuserijuhtivust, mis arvutatakse analoogselt valemiga (7), asendades soojustakistuse väärtused soojuserijuhtivuse väärtustega [9].

Maksimaalne suhteline arvutusviga e , %, arvutatakse valemiga (8) [9]:

$$e = \frac{R_{tot;upper} - R_{tot;lower}}{2 \times R_{tot}} \times 100\%, \% \quad (8)$$

kus

$R'_{tot;upper}$ - mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga risti olevaid sektsioone), $(m^2 \cdot K)/W$;
 $R''_{tot;lower}$ - mittehomogeensete kihtidega piirdetarindi kogusoojustakistuse alumine piirväärtus (vaadeldakse piirde pinnaga paralleelselt olevaid kihte), $(m^2 \cdot K)/W$.

Tuleb võtta arvesse soojustuses olevaid tühimikke (paigalduse vead), soojustuskihti läbivaid kinniteid, pööratud katusel sademete mõju ja õhu liikumist soojustuses, tuleb soojusläbivust

korrigeerida. Korrigeeritud soojusläbivus, U_c , saadakse arvutatud soojusläbivusele, U , paranduse ΔU lisamisega, valem (9) [9].

$$U_c = U + \Delta U, \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \quad (9)$$

Parandus, ΔU , $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, saadakse valemist (10):

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r + \Delta U_a, \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \quad (10)$$

- kus: ΔU_g - õhupiludest tingitud parandus, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$;
 ΔU_f - mehaanilistest kinnititest tingitud parandus, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$;
 ΔU_r - pööratud katusest tingitud parandus, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$;
 ΔU_a - soojustuse õhjuhtivusest tingitud parandus, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$;

Õhupilud võivad olla põhjustatud soojustusplaatide mõõtude erinevusest, soojustuse lõikamisel tekkivast mõõdu veast, teiste ehitusosade paigaldustolerantsist või mittetasapindsusest. Probleeme võib tekkida, kui soojustus on liiga pehme või liiga jäik [9].

Korrektset paigaldatud soojustuse ebaideaalsuse võib jagada kaheks [9]:

- soojusvoo suunas olevad õhkvahed soojustuse vahel ning soojustuse ja teiste ehitusosade vahel;
- soojusvoo suunaga risti olevad õhkvahed soojustuse vahel ning soojustuse ja teiste ehitusosade vahel.

Õhupiludest tingitud parandust ΔU_g , mõjutavad kolm paigaldustaset, mis sõltuvad õhupilude ulatusest ja nende paiknemisest, vt valem (11):

$$\Delta U_g = \Delta U'' \cdot \left(\frac{R_i}{R_{tot}} \right)^2, \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \quad (11)$$

- kus $\Delta U''$ - tegur, mis sõltub soojustuse paigaldustasemest, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$;
 R_i - pilusid sisaldava materjalikihi soojustakistus, mis arvutatakse valemiga (3) (soojuslikult homogeenne kiht) või valemiga (7) (soojuslikult mittehomogeenne kiht), $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$;
 R_{tot} - piirdetarindi kogusoojustakistus, mis arvutatakse valemiga (2) (homogeensete kihtidega piirdetarind) või valemiga (4) (mittehomogeensete kihtidega piirdetarind), $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$.

Parandustegur ΔU_a arvestab võimaliku soojustusesisese mikrokonvektsiooni mõju piirde soojuslähivusele, vt valem (12) [9]:

$$\Delta U_a = \Delta U_a'' \cdot \left(\frac{R_l}{R_T} \right)^2, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (12)$$

kus:

$\Delta U_a''$ - tegur, mis mõjub seintele või järsemale kui 45° kaldega katuslaele ning katuslaele ja põrandale (postvundamendi puhul või kui põrandaaluse ruumi tuulutusavade pindala on suurem kui 8% põrandapindalast), tabuleeritud väärtus;

R_l - õhku juhtivat materjali sisaldava kihi soojustakistus, mis arvutatakse valemiga (3) (soojuslikult homogeenne kiht) või valemiga (7) (soojuslikult mittehomoogeenne kiht);

R_T - piirdetarindi kogusoojustakistus, mis arvutatakse valemiga (2) (homogeensete kihtidega piirdetarind) või valemiga (4) (mittehomoogeensete kihtidega piirdetarind).

Soojuslevi pinnasesse

Soojuslevi pinnasesse iseloomustab [38]:

- soojusvool läbi põrandapindala, mis sõltub põrandapindala konstruktsioonist;
- soojusvool läbi põrandapindala ääreala, mis sõltub põrandapindala liitekohas asuvast külmasillast;
- aastane perioodiline soojusvool läbi põrandapindala ääreala, mis sõltub pinnase soojuslikust inertsist.

Põrandas tekkiva soojusvoolu kolmemõõtmelisusega arvestamiseks on standardis EVS-EN ISO 13770:2017 valemite kasutatud „tunnusmõõtmel“ B, mis on määratletud kui põrandapindala ja perimeetri väärtuse jagatis [38]:

$$B = \frac{A}{0,5 \times P} \quad (13)$$

kus B on põrandapindala tunnusmõõt, m;

A - on põrandapindala, m²;

P - on siseruumi avatud põrandapindala perimeeter (seina ja põrandapindala liitekohade pikkus, läbi mille toimub soojuskadu), m.

Põranda soojustakistust esindab selle ekvivalentne paksus, milleks on sama soojustakistusega maapinna paksus. Standardi EVS-EN ISO 13770:2017 tähenduses:

d_f on põrandate ekvivalentne paksus ja

$d_{w;b}$ on maapinnast allpool asuvate keldriseinte ekvivalentne paksus.

Pinnase soojuserikadu püsivates tingimustes on seotud ekvivalentse paksuse ja põranda tunnusmõõdme suhtega ning perioodilised soojuserikaod on seotud ekvivalentse paksuse ja perioodilise süvistussügavuse suhtega [38].

Soojuslähivus sõltub põranda tunnusmõõdust B (valem 13) ja ekvivalentsest kogupaksusest d_f , mis on arvutatav valemiga (14) [38].

$$d_f = d_{w;e} + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{f;sog} + R_{se}) \quad (14)$$

kus d_f on ekvivalentne kogupaksus, m;

$d_{w;e}$ - välisseina või vundamendi seinaga kogupaksus koos kõigi kihtidega (välisseina sisepinna ja sokli välispinna vaheline kaugus), m;

λ_g - pinnase soojuserijuhtivus, W/(m·K);

$R_{f;sog}$ - põrandaplaadis soojustakistus, kaasa arvatud kõik soojutuskihid plaadi peal, all ja vahel ning põrandakattematerjali soojustakistus, m²·K/W;

R_{si} - sisepinna soojustakistus, m²·K/W;

R_{se} - välispinna soojustakistus, m²·K/W.

Põranda soojuslähivuse arvutamiseks kasutatava valemi valik sõltub põranda soojusisolatsioonist, vastavalt valem (15), (16) või (17):

Kui $d_f < B$ (soojustamata ja mõõdukalt soojustatud põrandad),

$$U_{fg;sog} = \frac{2 \cdot \lambda_g}{\pi \cdot B + d_f} \cdot \left(\frac{\pi \cdot B}{d_f} + 1 \right), \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (15)$$

Kui $d_f \geq B$ (hästi soojustatud põrandad),

$$U_{fg;sog} = \frac{\lambda_g}{0,457 \cdot B + d_f}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (16)$$

Hästi soojustatud põrandate puhul võib valemi esitada alternatiivselt järgmisel kujul (vt valem 17) [38]:

$$U_{fg;sog} = \frac{1}{(R_{si} + R_f + R_{se} + d_{w;e} / \lambda_g) + R_{g;eff}}, \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (17)$$

kus $R_{g;eff}$ arvutatakse valemiga (18),

$$R_{g;eff} = \frac{0,457 \times B}{\lambda_g}, \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (18)$$

Välispiirete summaarne soojuserikadu

Välispiirete summaarne soojuserikadu leitakse valemiga (19) [7]:

$$H_e = \Sigma A \cdot U + \Sigma \Psi_j \cdot l_j + \Sigma \Psi_p \cdot n_p + \rho_a \cdot c_a \cdot V_{inf}, \quad \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad (19)$$

- kus
- A - välispiirete pindala, m²;
 - U - välispiirete soojusjuhtivus, W/(m²·K);
 - Ψ_j - joonkülmasilla lisakonduktants, W/(m·K);
 - l_j - joonkülmasilla pikkus, m;
 - Ψ_p - punktkülmasilla lisakonduktants, W/(m·K);
 - n_p - punktkülmasildade arv välispiirdes;
 - ρ_a - õhu tihedus, 1,2 kg/m³;
 - c_a - õhu erisoojus, 1,005 kJ/kg;
 - V_{inf} - infiltatsiooni õhuhulk, m³/s.

Infiltatsiooni õhuhulk arvutatakse valemiga (20):

$$V_{inf} = \frac{q_{50} \cdot A}{3,6 \cdot x}, \text{ m}^3/\text{s} \quad (20)$$

- kus q_{50} on hoone välispiirete keskmine õhulekkearvu baasväärtus, m³/(h·m²), vt tabel 8;
- A - välispiirete s.h. põrandate pindala, m²;
 - x - tegur, mis ühekorruselistel hoonetel 35, kahekorruselistel 24, kolme- ja enamakorruselistel 20.

Tabel 8: Hoone õhulekkearvu baasväärtused välispiirete ruutmeetri kohta [7]

| | Õhulekkearvu baasväärtus m ³ /(h·m ²) | Õhulekkearvu baasväärtus m ³ /(h·m ²) |
|-----------------|--|--|
| | Uus hoone, oluline rekonstrueerimine | Rekonstrueerimine, olemasolev hoone |
| Kasutusotstarve | | |
| Väikeelamu | 6 | 9 |
| Muud hooned | 3 | 6 |

Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta

Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta leitakse valemiga (21) [7]:

$$\sum \frac{H_e}{A}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (21)$$

kus H_e on välispiirete summaarne soojuserikadu, W/K;
 A - köetava pinna pindala, m^2 .

Soojuskaod läbi piirete tingituna piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist

Soojuskaod läbi piirete tingituna piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist leitakse valemiga (22) [39]:

$$\frac{H_e \cdot \text{kraadpäevad} \cdot 24}{A}, \frac{kWh}{m^2 \cdot a} \quad (22)$$

kus:

H_e - välispiirete summaarne soojuserikadu, W/K;
 kraadpäevad - kraadpäevade arv, °C d;
 24 - ööpäeva pikkus, h;
 A - köetava pinna pindala, m^2 .

Soojuskaod läbi piirete moodustavad ühe komponendi energiatõhususarvu (ETA) koosseisust. Soojuserikao leidmisel kasutatakse Tallinna normaalaasta kraadpäevade arvu tasakaalutemperatuuril 4220, mis pärineb Kredexi kodulehelt.

Avatäidete soojuslähivus

Välisuste ja akende soojuslähivused võetakse arvesse vastavalt toojapoolsetele andmetele.

2.3. Külmasillad

Külmasild on hoone piirdetarindi osa, kus muidu ühtlane soojuslähivus on lokaalselt suurem. Selle põhjus on piirdetarindi täielik või osaline läbistamine piirdetarindi vastava kihi materjaliga võrreldes suurema soojuserijuhtivusega materjaliga ja/või tarindi paksuse muutumine ja/või sise- ja välispindade erinevused, mis on iseloomulikud näiteks sein/põranda/lae liitekohtadele [40].

Välispiirete nurkade ja liitekohtade lisasoojuskaod võetakse eraldi arvesse geomeetriliste joonkülmasildade soojuslähivusega Ψ_j , W/(m·K). Samamoodi arvestatakse eraldi

soojuslähivusega ka muud tarinditest tulenevad külmasillad. Külmasillad võivad mõjutada tarindite niiskustlike ja soojuslike omadusi ning suurendada piirdetarindite soojuskadu.

[40]

Joonsoojuslähivuse kaudu kirjeldatakse piirdetarindi kahemõõtmelise liitekohaga või jookülmasilla soojuskadu. Piirdetaringi kahemõõtmelise liitekohaga või joonkülmasilla soojusvool võrreldes olukorraga, kui ei võeta arvesse külmasilla olemasolu, jagatud mõlemale poole joonkülmasilda jääva sise- ja väliskeskkonna temperatuurivahe ja külmasilla arvutusulatusega [40].

2.4. Temperatuurivälja arvutusprogramm Therm 7.6

Therm 7.6 on LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) poolt välja arendatud temperatuurivälja arvutusprogramm. Therm programmi kasutatakse kahemõõtmelise soojuslevi modelleerimiseks erinevates konstruktsiooni osades (aknad, uksed, seinad, vundamendid, katused), kus võib esineda külmasilda. Therm programmi soojuslevi analüüsi põhjal on võimalik hinnata konstruktsiooni energiatõhusust ja temperatuurijaotust, mille järgi saab tuvastada võimalikke kondensatsiooni, niiskuskahjustuse ja konstruktsiooni terviklikkusega seotud probleeme. Programm on mõeldud praktiliseks ja vabavaraliseks kasutamiseks kõigile konstruktsioonide optimeerimise ja külmasillavabade lahenduste loomise ning kontrolliga tegelevatele osapooltele (arhitektid, insenerid, materjalitootjad, hariduslikel eesmärkidel jne.). [41]

Programmi töö põhineb kahemõõtmeliste konduktiivsete ning kiirguslik soojavoogude analüüsi lõplike elementide meetodil, mille abil saab analüüsida ka keerulise geomeetriaga konstruktsioone [41].

Arvutusmodeli koostamisele eelnevalt on vaja määrata korrektsed simulatsioonisätted. Programmi seadistusmenüüst valida *Options* ja *Preferences* ning seejärel teek nimega *Therm File Options*. Jaotises *Mesh Control* olevad lahtrid tuleb ülevaalt alla täita numbritega 8, 2 ja 10 [42].

Therm arvutusmudeli koostamisel tuleb defineerida mudelis kasutatavad ääritingimused. Ääritingimuste lisamiseks tuleb toimida järgmiselt. Avada keskkonna ääritingimuste seadistusmenüü *Libraries* ja seejärel *Boundary Condition Library*. Nupule *New* vajutades saab koostada uue kirje. Avanenud aknas tuleb sisestada tingimuse nimetus ja seejärel täita lahtrid keskkonna temperatuuri ja pinna juhtivuse kohta käiva infoga. Pinna juhtivus *Film Coefficient* puhul on tegemist pinnatakistuse pöördväärtusega (näiteks: välispinna puhul $1/0,04 = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ja sisepinna puhul $1/0,13 = 7,69 \text{ W/(m}^2\text{K)}$). Ääritingimuste joonte värvust saab muuta nupu *Color* alt. Külmasilla arväärtus ei sõltu keskkonna ääritingimuse temperatuuri seadistusest ja need ei ole kuidagi ka standardiseeritud. Talvisele olukorralae vastava konstruktsiooni temperatuurijaotuse saamiseks kasutatakse arvutustes üldjuhul sisepinna temperatuuri $+21^\circ\text{C}$ ja välispinna temperatuuri -15°C . [42].

Materjalide ja materjalide teegi lisamine toimib sarnaselt piirtingimuste lisamisele. Therm seadistusmenüüst valida *Libraries* ja edasi *Material Library*. Uue materjali lisamiseks kasutada nuppu *New*. Lahtrisse *Conductivity* sisestada kasutatava materjali deklareeritud soojusjuhtivus ja lahtrisse *Emissivity* materjali emissiooniteguri väärtus, mille suurus peab olema 0,9 [42].

Lihtsamate geomeetriliste kujundite sisestamiseks on Therm programmis käsud *Draw polygon* ja *Draw rectangle*. Mudeli erinevate osade/pindade vaheliste konfliktide vältimiseks on soovitav seadistada *Snap Settings* vastavalt modelleerimise iseloomule. Keerukamate kujundite sisestamiseks on mõistlik kasutada AutoCad joonestusprogrammis koostatud dxf-tüüpi jooniseid [42].

Mudeli arvutustulemused väljastatakse ääritingimuste pikkusele taandatud nõ ekvivalentsele soojusläbivusele ja soojustakistusele ning soojusvooluna. Huvipakkuvate pindade arvutustulemuste kuvamiseks on vajalik defineerida pindade U-arvu „lipikud“ (*Ufactor Name*). Simulatsiooniprotsessi käivitamisele eelnevalt määratakse, milliste keskkonna ääritingimuste alusel programm U-arvu leiab ning valitakse vastav U-arvu lipik. U-arvu lipiku väärtus ei mõjuta arvutustulemusi, kuid on mõistlik defineerida kaks eraldi U-arvu lipikut sise- ja välismõõtmete järgi arvutatud tulemuste eristamiseks. U-arvu lipiku defineerimine toimub menüü *Libraries* ja *UFactor Names* teegi alt, kus tuleb vajutada nuppu *Add*. Avanenud aknas saab seadistada leitavate U-arvude lipikud [42].

Peale arvutusmodeli joonestamist ning välis- ja sisepindade defineerimist teostatakse Therm programmi poolt arvutus, mis visualiseerib vaikimisi konstruktsiooni samatemperatuurijooned ja U-arvu väärtused. Arvutusprotsessi käivitamiseks tuleb valida menüüst *Calculation* jaotuse alt avanevast rippmenüüst valik *Calculation* või vajutada tööriista ribal olevat „kollast välku“ kujutavat nuppu. Sama rippmenüü valiku *Show U-factors* valiku alt kuvatakse kõik arvutustulemused: arvutusulatus, soojuslähivus, -soojuslähivus, -soojustakistus, -geomeetrilised mõõtmed [42].

2.5. Joonkülmasildade arvutus

Piirdetarindite liitekohtade ja soojustuse katkestuse kolme- ja kahemõõtmeliste geomeetriliste mudelite arvutusreeglid sätestatakse standardis EVS-EN 10211:2017. Nendel alustel arvutatakse soojusvool, mille põhjal hinnatakse hoone või selle osa üldist soojuskadu ja tarindi sisepinna minimaalseid temperatuure niiskuspoleemide riski hindamiseks. [40]

Piirdetarindite 2D liitekohta joonsoojuslähivus ψ väärtused määratakse valemi (23) järgi [40]:

$$\psi = L_{2D} \cdot \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j, \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad (23)$$

kus

L_{2D} – on soojuserikadu, mis määratud kahte vaadeldavat keskkonda eraldava komponendi 2D arvutuse põhjal, W/(m·K);

U_j – on kahte vaadeldavat keskkonda eraldava 1-D komponendi, j, soojuslähivus W/(m²·K);

l_j – on pikkus, mille ulatuses kohaldatakse väärtust U_j , m.

Hoone soojuskadude arvutamisel võib külmasilla soojuslähivuse määramisel lähtuda tarindi sisemõõtudest, välismõõtudest või summaarsest sisemõõdust. Eestis kehtivast Hoone energiatõhususe arvutamise metoodikast tulenevalt lähtutakse hoone soojuskadude määramisel sisemõõtudest [43].

Vastavalt Hoone energiatõhususe arvutamise metoodikale leitakse hoone välispiirdeosa külmasildade summaarne soojuslähivus valemi (24) järgi [43]:

$$\Delta\psi = \sum \psi_j \cdot l_j + \sum \psi_p \cdot l_p, \quad \frac{W}{K} \quad (24)$$

kus Ψ_j on tarindi liitekohta joonkülmasilla soojusläbivus, $W/(m \cdot K)$, h;

Ψ_p – soojustuse katkestuse või soojustusest läbiviigu punktsoojusläbivus, $W/(m \cdot K)$;

l_j – joonkülmasilla pikkus, m;

l_p – samasuguste punktsoojusläbivuste arv välispiirdeosas.

Käesolevas töös on joonkülmasildade soojusläbivuste määramisel kasutatud temperatuurivälja arvutusprogrammi LBNL Therm 7.6 ja arvutused on teostatud mudeli sisemiste mõõtude alusel.

2.6. Temperatuuriindeksite arvutus

Külmasilla kriitilisust hinnatakse temperatuuriindeksi f_{Rsi} põhjal, mis leitakse temperatuurivälja tarkvara arvutustes kasutatud sise- ja välistemperatuuri ning minimaalse sisepinna temperatuuri abil valemi (25) järgi [7]:

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e} = \frac{R_T - R_{si}}{R_T}, \quad (25)$$

kus f_{Rsi} – temperatuuriindeks;

t_{si} – sisepinnatemperatuur, °C;

t_i – siseõhu temperatuur, °C;

t_e – välisõhu temperatuur, °C;

R_T – piirdetarindi kogusoojustakistus, $m^2 \cdot K/W$;

R_{si} – piirdetarindi sisepinna soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$.

Soojuskadude ja külmasilla temperatuuriindeksi arvutustes kasutatakse erinevaid sisepinna soojustakistuse suurus, mis standardi EVS-EN ISO 13788:2012 järgi on:

- sisepinna soojustakistus, aknaklaas $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot K/W$;
- sisepinna soojustakistus, ruumi ülejäänud osad $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \cdot K/W$;

Projekteerimisel või uute ja olemasolevate hoonete kvaliteedi hindamisel kasutatakse Eestis standardi EVS-EN ISO 13788:2012 järgseid piirsuursusi, mis on esitatud tabelis 9 [7].

Tabel 9: Hoonete projekteerimisel ja soojusliku kvaliteedi hindamisel kasutatavad piirsuurused Eestis.

| Niiskukoormus | Temperatuuriindeksi piirsuurus f_{Rsi} (mõõdetud või arvutatud tulemus peab olema piirsuurusest suurem) | |
|---|---|------------------------------|
| | Hallituse vältimine | Kondenseerumise vältimine |
| Niiskuselisa talvel +6 g/m ³ ja suvel +2,5 g/m ³ (suure asustusega ja halva ventilatsiooniga elamud) | ≥0,8 | ≥0,7 |
| Niiskuselisa talvel +4 g/m ³ ja suvel +1,5 g/m ³ (väikese asustustihedusega ja hea ventilatsiooniga elamud) | ≥0,65 | ≥0,55 |

Avatäidete puhul kasutatakse madalama väärtusega piirsuursusi.

2.7. Välispiirde kondenseerumisriski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga

Hoone välispiirete projekteerimisel tuleb lähtuda põhimõttest, et võimalused kondensatsioonivee tekkimiseks oleksid minimaliseeritud või selle tekkimisel oleks tagatud vee väljakuivamine [44].

Läbi seinamaterjali toimuvat difusiooni iseloomustab difusioonikonstant μ , mis näitab mitu korda on materjali difusioonitakistus suurem kui sama paksu seisva õhu (või mineraalvilla) kihi oma. Difusioonikonstant kirjeldab konkreetse materjali omadusi, aga ainult selle põhjal ei ole võimalik hinnata teatud seinakihi aurutakistust S_d , mis annab pildi kogu seina difusioonist käitumisest. Seinakihi aurutakistuse arvutamiseks on vaja materjali difusioonikonstant korrutada kihi paksusega (valem 26). Saadakse seisva õhu kihi paksus meetritest S_d , millel on samasugune difusioonitakistus kui vaadeldaval materjalil [44]:

$$S_d = \mu \cdot s, m \quad (26)$$

kus μ on vaadeldava ehitusmaterjali difusioonikonstant;

s - materjalikihi paksus, m.

Välispiirete projekteerimisel tuleb lähtuda rusikareeglist, et seinakihtide aurutakistused peavad seest väljapoole vähenema ehk väljaspool oleva kihi aurutakistus ei tohi sisemise omast olla suurem. Seinade summaarne aurutakistus ei ole eelkirjeldatud kontekstis oluline. Kogu seinade aurutakistus on üksikute kihtide aurutakistuste summa, mis leitakse valemiga (27) [44]:

$$S_d = S_{d1} + S_{d2} + S_{d3} + \dots S_{dN}, \text{ m} \quad (27)$$

Veeauru osarõhk (ehk partsiaalrõhk) ruumis arvutatakse valemiga (28) [44]:

$$P = P_s \cdot \varphi, \text{ Pa} \quad (28)$$

kus P_s on küllastunud aururõhk, Pa;

φ - relatiivne õhuniiskuse, %.

Küllastunud aururõhk on konkreetsel temperatuuril maksimaalne võimalik õhus sisalduva veeauru rõhk. Tegemist on tabuleeritud väärtusega. Relatiivne niiskus on õhus sisalduva veeauru koguse suhe veeauru küllastuskogusesse või vastavalt veeauru osarõhu suhe küllastusrõhuse. [44]

Materjalikihi veeauru difusioonitakistus arvutatakse valemiga (29) [44]:

$$\frac{1}{\Delta} = \mu \cdot s \cdot \frac{1}{\delta_L}, \frac{\text{m}^2 \text{hPa}}{\text{kg}} \quad (29)$$

kus μ on difusioonitakistuskonstant;

s – ehitusmaterjali kihipaksus, m;

δ_L – õhu aurujuhtivusväärtus, kg/mhPa.

δ_L on seotud ümbritseva õhu temperatuuriga, kuid antud arvutustes võib kasutada kui konstanti [44]:

$$\delta_L \approx 0,68 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mhPa}.$$

Seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinade puhul leitakse valemiga (30):

$$\frac{1}{\Delta} = \Sigma(\mu_n \cdot s_n) \cdot 1,5 \cdot 10^6, \frac{\text{m}^2 \text{hPa}}{\text{kg}} \quad (30)$$

Veeauru difusioonivoog i arvutatakse tulenevalt sisemisest p_i ja välimisest p_a partsiaalrõhkudest valemi (31) järgi [44]:

$$i = \frac{p_i - p_a}{l/\Delta}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}} \quad (31)$$

kus p_i on sisemine partsiaalarõhk, Pa;

p_a –välimine partsiaalarõhk, Pa;

$1/\Delta$ –seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinaga puhul, m^2hPa/kg .

Difusiooni arvutuse eesmärk on tuvastada seinas kondensatsioonivee tekkimine või selle puudumine. Kondensatsioonivee tekkimisel ei tuleb välistada seinakonstruktsioonide ja soojustusmaterjalide kahjustumine. Selle tagamiseks tuleb jälgida, et (vastavalt DIN 4108-3 järgi) [44]:

- kondenseerumisperioodil tekkinud kondensatsioonivesi kuivamisperioodil välja kuivaks;
- kondensatsioonivesi konstruktsioone ei kahjustaks (korrosioon, seened);
- kondensatsioonivee kogus konstruktsioonis ei ületaks $1,0 \text{ kg/m}^2$ kohta;
- kapillaarselt mitteimavate ehitusainete korral on kondensatsioonivee kogus ei ületaks $0,5 \text{ kg/m}^2$;
- puidu puhul ei ületaks niiskussisaldus 5%, puidust ehitusmaterjali puhul 3%.

Arvutuste tegemisel arvestada järgmiste raamtingimustega (DIN 4108-3 järgi):

- kondenseerumisperioodil (t_T):
 - väliskliima -10°C , 80% relatiivne niiskus;
 - sisekliima $+20^\circ\text{C}$, 50% relatiivne niiskus;
 - perioodi pikkus 1440 h (60 päeva). Eesti tingimustes võiks perioodi pikendada kuni 2160 h. (90 päeva).
- aurumisperioodil (t_V):
 - seinad ja mitte vastu katust olevad laed:
 - väliskliima $+12^\circ\text{C}$, 70% relatiivne niiskus;
 - sisekliima $+12^\circ\text{C}$, 70% relatiivne niiskus;
 - kliima kondenseerumiskohas $+12^\circ\text{C}$, 100% relatiivne niiskus;
 - perioodi pikkus 2160 h (90 päeva).
 - laed vastu katust:
 - väliskliima $+12^\circ\text{C}$, 70% relatiivne niiskus;
 - katusepinna temperatuur $+20^\circ\text{C}$;
 - sisekliima $+12^\circ\text{C}$, 70% relatiivne niiskus;
 - kliima kondenseerumiskohas temperatuur vastavalt temperatuurikõverale,

- 100% niiskus;
- perioodi pikkus 2160 h (90 päeva).

Kondensatsioonivee kogus W_T arvutatakse valemi (32) järgi [44]:

$$W_T = t_T \cdot (i_i - i_a), \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (32)$$

kus t_T on kondenseerumisperiood, h;

- i_i – difusioonivoo tihedus seest kondenseerumiskiirkonda, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$;
- i_a – difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast välja, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$.

Difusioonivoo tihedus seest kondenseerumiskiirkonda arvutatakse valemi (33) järgi [44]:

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{1/\Delta_i}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}} \quad (33)$$

kus p_i on sisemine partsiaalarõhk, Pa;

- p_{sw} – kondenseerumisele vastav rõhk, Pa;
- $1/\Delta_i$ – seinavaeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinapuhul, $\text{m}^2\text{hPa}/\text{kg}$.

Difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast välja arvutatakse valemi (34) järgi [44]:

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}} \quad (34)$$

kus p_{sw} on kondenseerumispunktile vastav rõhk, Pa;

- p_a – väline partsiaalarõhk, Pa;
- $1/\Delta_a$ – seinavaeauru difusioonitakistus mitmekihilise seinapuhul, $\text{m}^2\text{hPa}/\text{kg}$.

Kuivava vee kogus arvutatakse valemi (35) järgi:

$$W_w = t_v \cdot (i_i + i_a), \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad (35)$$

kus t_v on kuivamisperiood, h;

- i_i – difusioonivoo tihedus seest kondenseerumiskiirkonda, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$;
- i_a – difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast välja, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$.

Difusioonivoo tihedus kondenseerumiskiirkonnast ruumi sisse arvutatakse valemi (36) järgi:

$$i_i = \frac{p_{sw} - p_i}{1/\Delta_i}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}} \quad (36)$$

kus p_{sw} on kondenseerumispunktile vastav rõhk, Pa;

- p_i – sisemine partsiaalarõhk, Pa;

$1/\Delta_i$ – seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seina puhul, $\text{m}^2\text{hPa/kg}$.

Difusioonivoo tihedus kondenseerumispiirkonnast välja arvutatakse valemi (37) järgi:

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{h}} \quad (37)$$

kus p_{sw} on kondenseerumispunktile vastav rõhk, Pa;

p_a – väline partsiaالرõhk, Pa;

$1/\Delta_a$ – seina veeauru difusioonitakistus mitmekihilise seina puhul, $\text{m}^2\text{hPa/kg}$.

Mitmes tasandis või kihis tervikuna toimunud kondenseerumise korral tuleb kihid arvutada eraldi [44].

Lubatud kondensatsioonivee kogus peab vastama tingimusele $W_T < 1,0 \text{ kg/m}^2$ (või $0,5 \text{ kg/m}^2$ kapillaarselt mitteimavate ehitusmaterjalide puhul) ja $W_V > W_T$ [44].

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Hoonete välispiirete soojuslähivuse arvutus

Soojuslähivuse arvutuste lähteandmed (soojuserijuhtivus, kihtide paksused) on võetud tabelist 6 ja võrdlushoone tarindeid kirjeldavast peatükist 2.1. Käesolevas peatükis on arvutustulemused esitatud koondtabelitena, arvutuskäigud vt Lisa 1.

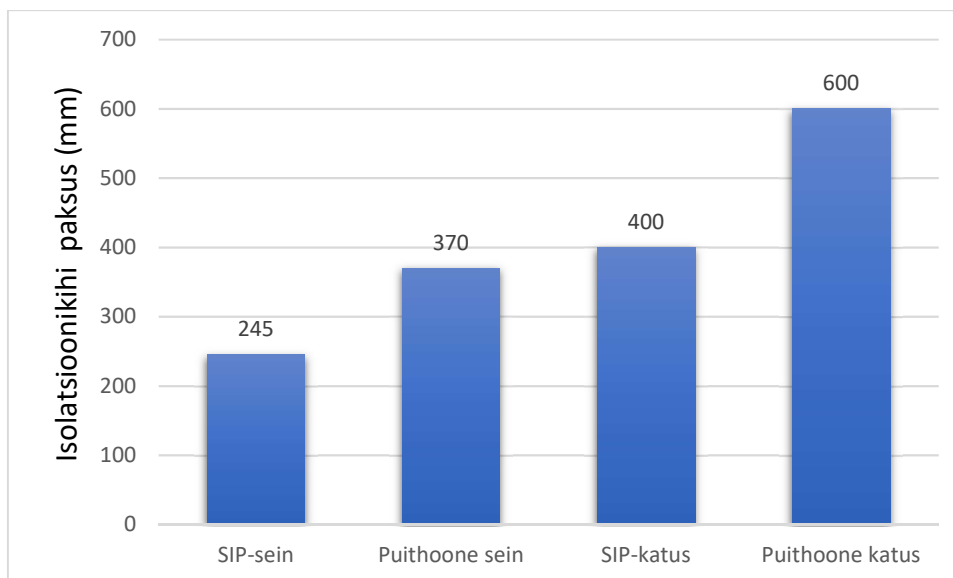
Avatäidete soojuslähivus.

Avatäidete soojuslähivuseks arvestatakse akendel 0,95 W/(m²K) ja välisustel 1,1 W/(m²K).

Arvutustulemuste ülevaade ja võrdlus

Võrdlushoonete piirdetarindite ja avatäidete soojuslähivused ja nende võrdlus Energiatõhususe miinimumnõuetega on esitatud tabelis 10. Mõlema hoone tarindite soojuslähivused jäävad nõutud piiridesse ja mõningate positsioonide puhul on isegi natukene madalamad nõutust. Nagu tabelist 10 nähtub on käesoleva töö eesmärgiks võrrelda ainult hoonete seinte ja katusekonstruktsioonide soojuslähivuste väärtusi. Sellest tulenevalt ongi põrandate ja avatäidete soojuslähivused mõlemal hoonel valitud sama väärtusega. Arvutustulemuste põhjal on SIP-hoone sein- ja katusetarindi soojuslähivused puitkarkasshoone omadest ca kolmandiku võrra madalamad (vastavalt 33% ja 38%).

Puithoone seintele ja lagedele peaks SIP-hoonega samade soojuslähivuste saavutamiseks paigaldama vastavalt 120 mm ja 200 mm lisasoojustust (vt joonis 17) ehk siis sama soojuslähivuse ($U_{\text{sein}}=0,12\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, $U_{\text{katus}}=0,08\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) juures on SIP seinapaneeli soojustuse paksus 245 mm ja puitkonstruktsioonil soojustuskihi paksus 370 mm, katusekonstruktsiooni puhul vastavalt 400 mm ja 600 mm.



Joonis 17: Samale soojuslähivusele ($U_{\text{sein}}=0,12\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, $U_{\text{katus}}=0,08\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$) vastav soojustuskihi paksus millimeetrites erinevate konstruktsioonitüüpide näitel.

Tabel 10: SIP- ja puithoone piirdetarindite soojuslähivused ja nende võrdlus Eesti kehtivate määrustega

| Piirdetarindi osa | SIP-hoone | Puitkarkasshoone | Soojuslähivuste erinevused % | Energiatõhususe miinimumnõuded $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ |
|-------------------|--|--|------------------------------|--|
| | U $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | U $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | | |
| Põrand | 0,09 | 0,09 | 0% | 0,1 - 0,15 |
| Välissein | 0,12 | 0,16 | 33% | 0,12 - 0,22 |
| Katus | 0,08 | 0,11 | 38% | 0,1 - 0,15 |
| Aknad | 0,95 | 0,95 | 0% | 0,6 - 1,1 |
| Välisüksed | 1,10 | 1,10 | 0% | 0,6 - 1,1 |

Suur soojuslähivuse erinevus tuleneb otseselt SIP- ja puitkarkasshoone kandekonstruktsioonide põhimõttelisest erinevusest – puithoonel on kandvaks elemendiks puitprussidest postid ja sarikad, SIP-hoonel OSB plaadi ja vahtpolüstüreeni ühendamisel tekkiv komposiitsüsteem (SIP-paneel). SIP-hoone seinte jäigastamiseks ja paneelide omavaheliseks ühendamiseks kasutatakse seina vertikaalsetes ühendusvuukides SIP-poste („mini-SIP“ ühenduselemente), mis koosnevad peamiselt soojustustmaterjalist ja tulenevalt SIP-paneeli laiusmõõtmest on nende samm 1250mm. Teistes sõlmede (nurgasõlmed, liitumised teiste tarinditega, tarindi ja avatäidete perimeetrid jne), tugevdamiseks kasutatakse puitmaterjali (sh katusepaneelide ühendussõlmes kasutatav STEICOjoist SJ90 tala). Seevastu puitkarkasshoonel paigaldatakse iga 600 mm tagant soojustuskihti läbivad karkassipostid ja sarikad. Kandekonstruktsiooni põhimõttelisest erinevusest tulenevalt on

SIP-konstruktsiooni ristlõikes puitmaterjali osakaal oluliselt väiksem kui puitkonstruktsioonil. Mõlema hoone seina- ja katusekonstruktsiooni soojustuskihi lõikes olevate materjalide osakaalud on kirjeldatud tabelis 11. Nimetatud tabelis on materjalide osakaalud arvestatud puhta seinapinna ühiku kohta ehk arvestamata on jäetud liitekohtade konstrueerimisel kasutatav puitmaterjal.

Tabel 11: SIP- ja puithoone seina- ja katusekonstruktsioonide soojustuskihis olevate materjalide osakaalud soojustuskihi kogumahust (ei ole arvestatud liitekohtade puitmaterjali)

| | Seinakonstruktsiooni materjalide osakaalud soojustuskihi mahus | | Katusekonstruktsiooni materjalide osakaalud soojustuskihi mahus | |
|-----------|--|-----------|---|-----------|
| | puut | soojustus | puut | soojustus |
| SIP-hoone | 0,88% | 99,12% | 3,25% | 96,75% |
| Puithoone | 8,33% | 91,67% | 8,85% | 91,15% |

Tabelist 11 nähtub, et puithoonega võrreldes on SIP-hoone seina- ja katusekonstruktsiooni ristlõikes puidu osakaal oluliselt väiksem (vastavalt 9 ja 2,7 korda).

3.2. Joonkülmasildade arvutus

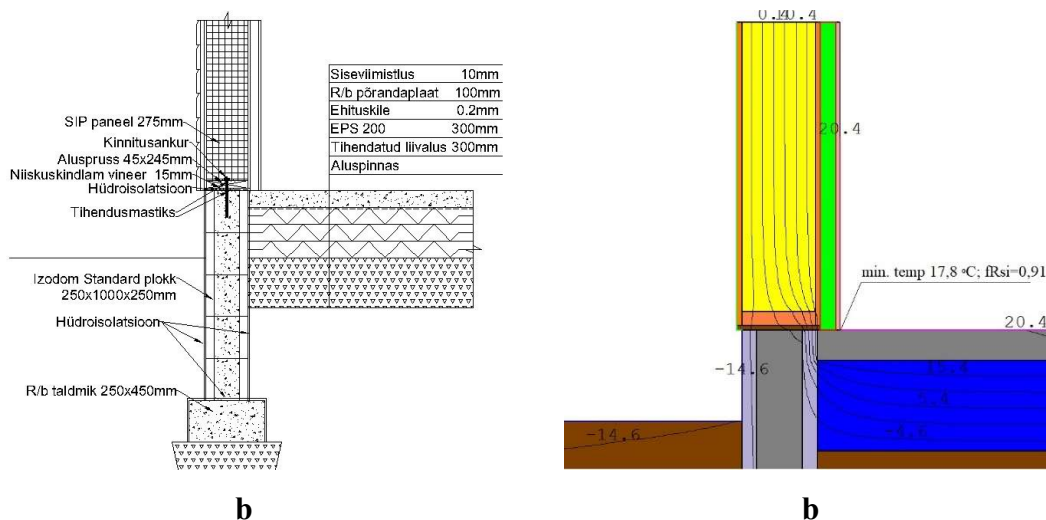
Külmasildade joonsoojusläbivused on arvutatud Therm arvutusprogrammist leitud arvutusulatuse soojusvoo ja valemi (23) järgi. Käesolevas peatükis on näitena toodud kahe SIP-hoone liitekoha joonsoojusläbivuse arvutusmudeli joonised ja arvutused. Ülejäänud liitekohtade arvutuskäigud vt Lisa 2. Temperatuurivälja arvutustes kasutatud soojuslikud ääritingimused on tabelis 12.

Tabel 12: Temperatuurivälja arvutustes kasutatud soojuslikud ääritingimused

| Soojusliku ääritingimuse nimetus | h (W/m ² K) | t (°C) |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------|
| Adiabatic | 0 | 0 |
| Exterior -15 SEIN Rs=0,13 | 7,69 | -15 |
| Exterior -15 KATUS Rs=0,1 | 10 | -15 |
| Interior 21 fRsi Rs=0,25 | 4 | 21 |
| Interior 21 ALLA Rs=0,17 | 5,88 | 21 |
| Interior 21 HORISONTAALNE Rs=0,13 | 7,69 | 21 |
| Interior 21 ÜLES Rs=0,1 | 10 | 21 |

SIP-hoone joonsoojusläbivused

Põrand pinnasel – välissein ühendusest tulenev joonsoojusläbivus tabelis 13 ja liitekohta sõlm joonisel 18:



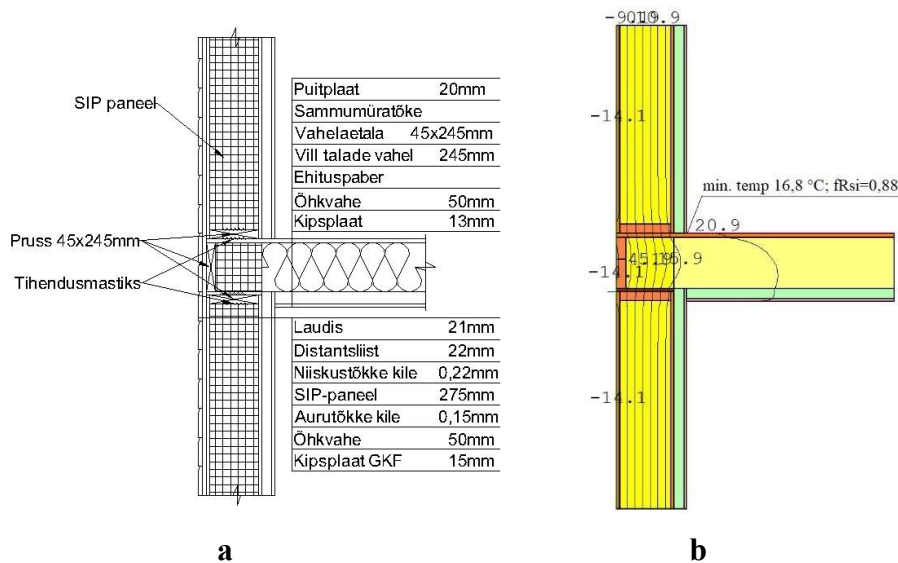
Joonis 18: SIP-hoone põrand pinnasel – välissein liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmodel;

Tabel 13: SIP- hoone põrand pinnasel - välissein liitekohta joonsoojusläbivuse arvutusandmed

| Põrand pinnasel - välissein | | |
|-----------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,588 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1226 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1015 | mm |
| U _j , 2. põrand | 0,0894 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. põrand | 4000 | mm |
| Min temp | 17,8 | C |
| fRSI | 0,91 | C |
| Soojusvool | 21,15 | W |
| ψ | 0,11 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,588 - (0,1226 \cdot 1015 + 0,0894 \cdot 4000) / 1000 = 0,11 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Välissein-vahelagi ühendusest tulenev joonsoojuslähivus tabelis 14 ja liitekohta sõlm joonisel 19:



Joonis 19: SIP-hoone välissein - vahelagi: a – sõlmejoonis; b - arvutusmudel;

Tabel 14: SIP-hoone välissein - vahelagi liitekohta joonsoojuslähivuse arvutusandmed

| Välissein - vahelagi | | |
|----------------------|--------|----------|
| L2D | 0,334 | W |
| Uj, 1. sein | 0,1226 | W/(m²·K) |
| lj, 1. sein | 1000 | mm |
| Uj, 2. sein | 0,1226 | W/(m²·K) |
| lj, 2.sein | 1000 | mm |
| Min temp | 16,8 | C |
| fRSI | 0,88 | C |
| Soojusvool | 12,00 | W |
| ψ | 0,09 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,334 - (0,1226 \cdot 1000 + 0,1226 \cdot 1000) / 1000 = 0,09 \text{ W/(m·K)}$$

SIP-hoone ja puitkarkasshoone külmasildade väärtuste võrdlus hoone energiatõhususe arvutamise meetodikas toodud soovituslike joonsoojuslähivuste väärtustega uutele hoonetele on toodud tabelis 15. Tabelist nähtub, et puitkarkasshoone liitekohtade joonsoojuslähivused on kõikides positsioonides SIP hoone samadest väärtustest 0,01-0,02 ühikut madalamad või võrdsed. Kõikidele kõrgemate ja kehvemate väärtustega SIP-hoone sõlmedele on iseloomulikud kogu sõlme ulatust (välikeskkonnast otse siseruumi) läbivad OSB või vineerikihid (vt joonis 19.b). Tegemist on SIP-süsteemi tavapäraste ja iseloomulike sõlmedega. Eelkirjeldatud liitekohtasid täies ulatuses puitplaatidega läbistamine tuleneb otseselt SIP-paneelide konstrueerimise tehnoloogiast ja enamus juhtudel ei olegi võimalik neid sõlmi teistmoodi lahendada. Ühe võimaliku lahendusena külmasildade vähendamiseks

on katta majakarp välispidiselt lisasoojustusega. Teine liitekohta joonsoojuslähivuse suurust mõjutav tegur on sellega liituvate tarindite soojuslähivus (võrreldaval puithoonel on see kõrgem), millest tulenevalt on puitkarkasshoone külmasilla mõju tarindile madalam.

Tabel 15: SIP- ja puithoone joonsoojuslähivuste võrdlus hoone energiatõhususe arvutamise metoodikas toodud soovituslike soojuslähivuste väärtustega uutele hoonetele

| Sõlme nimetus | SIP- hoone ψ W/(mK) | Puitkarkass- hoone ψ W/(mK) | Energiatõhususe arv. met. väärtused ψ W/(mK) |
|-------------------------------|--------------------------------|--|---|
| Põrand-pinnasel- välissein | 0,11 | 0,10 | 0,3 |
| Välisnurk | 0,05 | 0,03 | 0,2 |
| Välissein-katus | 0,05 | 0,03 | 0,2 |
| Välissein-vahelagi | 0,09 | 0,08 | 0,1 |
| Räästasõlm | 0,07 | 0,06 | 0,2 |
| Harjasõlm | 0,03 | 0,03 | - |
| Akna seinakinnitus | 0,03 | 0,03 | 0,2 |
| Ukse seinakinnitus | 0,03 | 0,03 | 0,3 |

Võrreldes arvutustes saadud joonsoojuslähivusi *Hoone energiatõhususe arvutamise metoodikas* antud soovituslike väärtustega erinevad tulemused mitmekordselt. Ilma liitekohtade soojuslähivuste arvutamiset ja tuginedes ainult määruses antud väärtustele oleks võrdlushoone summaarne joonsoojuslähivus olnud tugevalt alahinnatud.

3.3. Tähtsamate sõlmede temperatuuriindeksite arvutused Therm andmete järgi

Temperatuuriindeksite arvutustes kasutatav sisepinna madalaim temperatuur on leitud Therm temperatuurivälja arvutustes. Temperatuuriindeksi arvutusmudel is kasutatud soojuslikud ääritingimused on tabelis 12, arvutuskäigud vt Lisa 3 ja saadud tulemused esitatud tabelis 16.

Tabel 16: SIP- ja puithoone temperatuuriindeksid võrdluses temperatuuriindeksi piirsuurusega.

| Liitekoht | SIP-hoone | Puithoone | Temperatuuri- indeksi piirsuurus |
|-------------------------------|------------------|------------------|--|
| | ψ W/(mK) | ψ W/(mK) | |
| Põrand-pinnasel- välissein | 0,91 | 0,90 | ≥0,8 |
| Välisnurk | 0,94 | 0,94 | |
| Välissein-katus | 0,94 | 0,94 | |
| Välissein-vahelagi | 0,88 | 0,88 | |
| Räästasõlm | 0,90 | 0,90 | |
| Harjasõlm | 0,96 | 0,93 | |
| Akna seinakinnitus | 0,83 | 0,83 | |
| Ukse seinakinnitus | 0,83 | 0,83 | |

Temperatuurivälja arvutuste soojuslikest ääritingimustest ja arvutusmudelist saadud madalaima temperatuuri väärtustest tulenevalt jäävad SIP-hoone temperatuuriindeksid vahemikku 0,83-0,96 ja puithoonel 0,83-0,94. Mõlema hoone temperatuuriindeksid on samas suurusjärgus ja ületavad standardist EVS-EN ISO 13788:2012 tulenevat uutele hoonetele kehtestatud temperatuuriindeksi piirsuurust 0,8. Kõige madalam temperatuuriindeks oli mõlemal hoonel akna seinakinnituse liitekohas.

3.4. Välispiirete summaarne soojuserikadu

Hoone piirdetarindite pindalad ja joonkülmasildade pikkused on arvutatud võrdlushoone arhitektuurse osa jooniste järgi. SIP- ja puithoone piirdetarindite soojusläbivused ning liitekohtade joonsoojusläbivused on koondatud tabelisse 17. Sellele järgnevas tabelis 18 on võrreldud välispiirete summaarse soojuserikao erinevust, arvestamata õhulekete soojuskadusid. Õhulekkest tulenev soojuserikadu on kõnealusest võrdlusest välja jäetud järgmistel põhjustel: 1) töö eesmärk on hinnata võrdlushoonete välispiirete ja nende liitekohtade erinevus soojus- ja niiskustehnilises mõttes 2) õhulekkest tuleneva soojuserikao arvestus on hinnanguline põhinedes ainult õhulekkearvu baasväärtusele 3) ei kirjelda kuidagi reaalselt võrdlushoone õhupidavust 4) hooned on arhitektuurselt täpselt samasugused ehk arvutuste järgi on mõlema hoone õhulekkearv sama.

Arvutustulemustest nähtub, et SIP-hoone summaarsest soojuserikaost 83% moodustavad soojuskaod läbi piirdetarindi ja 17% soojuskaod läbi külmasildade, puithoonel samad näitajad vastavalt 86% ja 14% ehk soojuskadude jaotus on samas proportsioonis.

Tabel 17: SIP- ja puithoone välispiirete summaarne soojuserikadu (ilma infiltratsioonita)

| Soojukaod läbi piirdetarindi | A m ² | SIP-hoone | | | Puitkarkasshoone | | |
|---|---------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------|
| | | U W/(m ² K) | A x U W/K | A x U + l x ψ % | U W/(m ² K) | A x U W/K | A x U + l x ψ % |
| Põrand | 94,21 | 0,09 | 8,48 | 12% | 0,09 | 8,48 | 11% |
| Välissein | 146,58 | 0,12 | 17,59 | 25% | 0,16 | 23,45 | 30% |
| Katus | 107,86 | 0,08 | 8,63 | 12% | 0,11 | 11,86 | 15% |
| Aknad | 19,03 | 0,95 | 18,08 | 26% | 0,95 | 18,08 | 23% |
| Välisüksed | 4,33 | 1,10 | 4,76 | 7% | 1,10 | 4,76 | 6% |
| $\Sigma A \cdot U$ | 372,01 | | 57,54 | 83% | | 66,64 | 86% |
| Soojuskaod läbi külmasildade | l m | ψ W/(mK) | l x ψ W/K | A x U + l x ψ % | ψ W/(mK) | l x ψ W/K | A x U + l x ψ % |
| Põrand-pinnasel-välissein | 38,90 | 0,11 | 4,28 | 6% | 0,10 | 3,89 | 5% |
| Välisnurk | 16,04 | 0,05 | 0,80 | 1% | 0,03 | 0,48 | 1% |
| Välissein-katus | 20,16 | 0,05 | 1,01 | 1% | 0,03 | 0,60 | 1% |
| Välissein-vahelagi | 21,40 | 0,09 | 1,93 | 3% | 0,08 | 1,71 | 2% |
| Räästasõlm | 21,40 | 0,07 | 1,50 | 2% | 0,06 | 1,28 | 2% |
| Harjasõlm | 10,70 | 0,03 | 0,32 | 0% | 0,03 | 0,32 | 0% |
| Akna seinakinnitus | 64,62 | 0,03 | 1,94 | 3% | 0,03 | 1,94 | 3% |
| Ukse seinakinnitus | 10,46 | 0,03 | 0,31 | 0% | 0,03 | 0,31 | 0% |
| $\Sigma l \cdot \psi$ | | | 12,09 | 17% | | 10,55 | 14% |
| $\Sigma (A \cdot U + l \cdot \psi) \text{ (W/K)}$ | | | 69,62 | 100% | | 77,18 | 100% |

Tarindite ja külmasildade soojuserikadude võrdlus toodud tabelis 18. Võrdlusest on näha, et SIP-hoone välispiirete soojuserikadu on 13,1% madalam ja külmasildadest tulenev soojuskadu 2,2% kõrgem kui puithoonel, millest tulenevalt välispiirete summaarne soojuserikadu on 10,9% madalam puithoone omast. Suurima osa sellest erinevusest moodustab läbi välisseinte toimuv soojuskadu, külmasildade erinevuse osakaal summaarsest soojuserikaost on marginaalne ja võib öelda, et võrdlushoonete liitekohtade soojusläbivus on samaväärne.

Tabel 18: SIP- ja puitkarkasshoone soojuserikadude (ilma infiltratsioonita) arvuline ja protsentuaalne erinevus

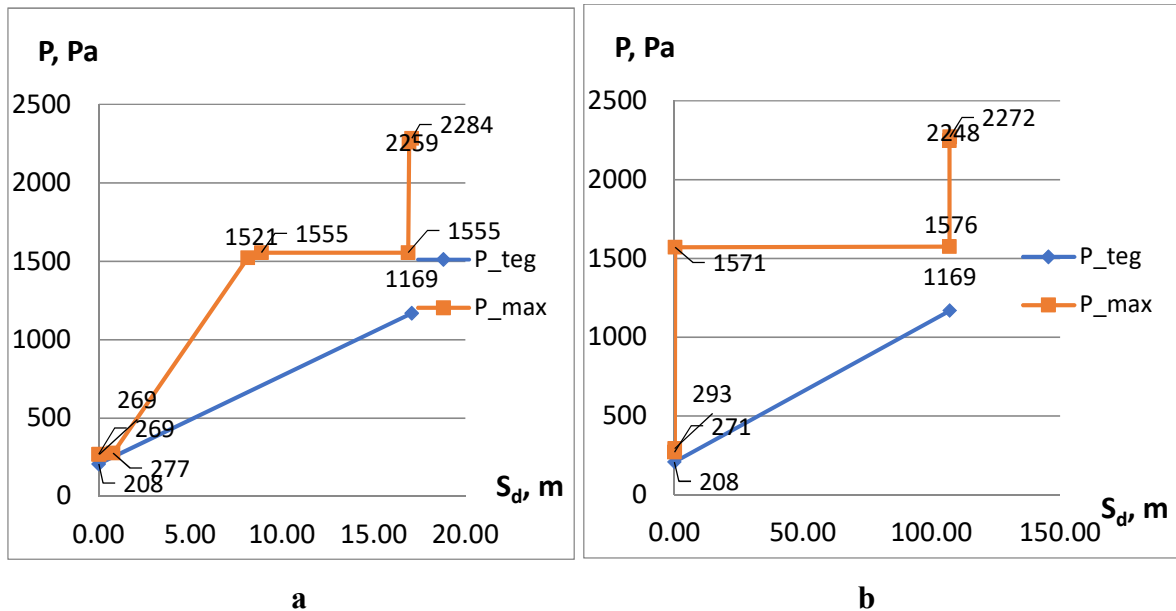
| Soojuskaod läbi piirdetarindi | SIP-hoone $A \times U$ W/K | Puitkarkasshoone $A \times U$ W/K | Soojuskadude erinevus (puit - SIP) W/K | Soojuskaod erinevuse osakaal summaarsest soojuskaost % |
|---|----------------------------------|---|---|---|
| Põrand | 8,48 | 8,48 | 0,00 | 0,0% |
| Välissein | 17,59 | 23,45 | 5,86 | 8,4% |
| Katus | 8,63 | 11,86 | 3,24 | 4,6% |
| Aknad | 18,08 | 18,08 | 0,00 | 0,0% |
| Välisüksed | 4,76 | 4,76 | 0,00 | 0,0% |
| $\Sigma A \cdot U$ | 57,54 | 66,64 | 9,10 | 13,1% |
| Soojuskaod läbi külmasildade | $l \times \psi$ W/K | $l \times \psi$ W/K | Soojuskadude erinevus (puit - SIP) W/K | Soojuskaod erinevuse osakaal summaarsest soojuskaost % |
| Põrand-pinnasel-välissein | 4,28 | 3,89 | -0,39 | -0,6% |
| Välisnurk | 0,80 | 0,48 | -0,32 | -0,5% |
| Välissein-katus | 1,01 | 0,60 | -0,40 | -0,6% |
| Välissein-vahelagi | 1,93 | 1,71 | -0,21 | -0,3% |
| Räästasõlm | 1,50 | 1,28 | -0,21 | -0,3% |
| Harjasõlm | 0,32 | 0,32 | 0,00 | 0,0% |
| Akna seinakinnitus | 1,94 | 1,94 | 0,00 | 0,0% |
| Ukse seinakinnitus | 0,31 | 0,31 | 0,00 | 0,0% |
| $\Sigma l \cdot \psi$ | 12,09 | 10,55 | -1,54 | -2,2% |
| $\Sigma (A \cdot U + l \cdot \psi) \text{ (W/K)}$ | 69,62 | 77,18 | 7,56 | 10,9% |

Vastavalt Lisa 1.6. ja Lisa 1.7. toodud arvutustele on SIP-hoone summaarne soojuserikadu (sh infiltratsioon) 100,99 W/K ja summaarne soojuserikadu kütava pinna kohta 0,64 W/m²K. Puitkarkasshoonel vastavalt 108,55 W/K ja 0,68 W/m²K. Piirete soojuslähivustest ja õhu infiltratsioonist tulenev soojuskadu SIP-hoonel $64,33 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$ ja puitkarkasshoonel $69,14 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$. Saadud arvutustulemustest nähtub, et SIP hoone välispiirete summaarne soojuserikadu on 7,5% madalam kui puitkarkasshoonel.

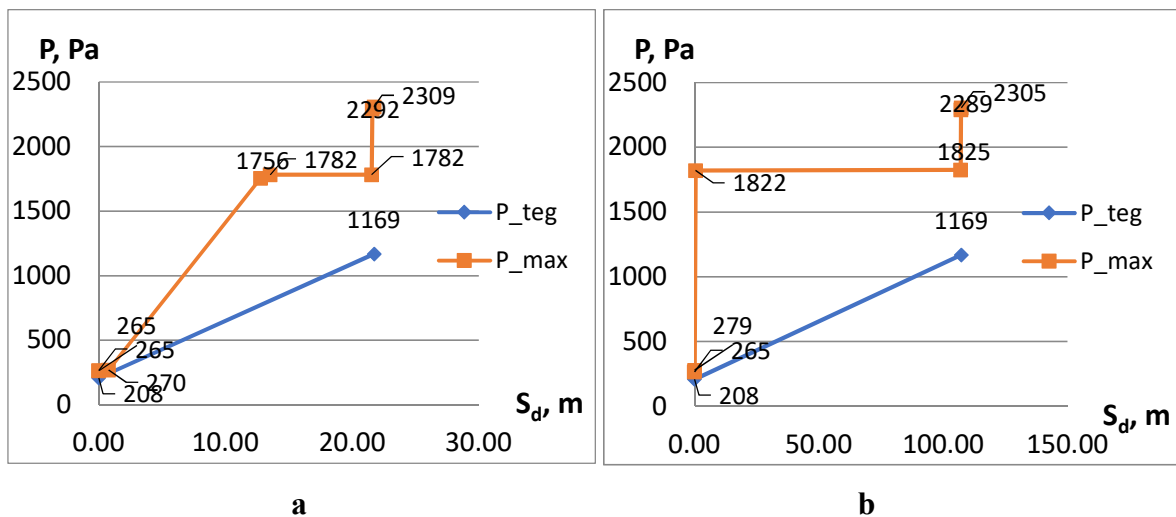
3.5. Välispiirde kondenseerumisriski ja väljakuivamise arvutus Glaseri meetodiga

Kondenseerumisriski arvutustes kasutatud materjalide difusioonitakistuskonstandid ja

aurutakistused on võetud tabelist 6. Vastavalt töö Lisa 4 järgi toodud arvutustele SIP- ja puitkarkasshoone piirdetarindites kondenseerumisriski ei esine. SIP-süsteemi ja puitkonstruktsiooni kondenseerumisgraafikud toodud joonistel 20.a, 20b, 21.a ja 21.b.



Joonis 20. Võrdlushoonete seinakonstruktsiooni kondenseerumisriski graafik: a) puitkarkasshoone; b) SIP-hoone.



Joonis 21. Võrdlushoonete katusekonstruktsiooni kondenseerumisriski graafik: a) puitkarkasshoone; b) SIP-hoone.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli võrrelda SIP-hoone ja puitkarkasshoone soojus- ja niiskustehnilisi omadusi samasuguste lähteandmete juures. Selle tarbeks koostati kaks arhitektuurselt samasugust projekti, millest üks lahendati SIP-paneelidega ja teine puitkarkassiga. Mõlema hoone puhul kasutatud soojustusmaterjalide soojuslikud näitajad ja kihipaksused valiti selliselt, et tarindite soojuslähivus soojustuse sektsioonis oleks samaväärne ($U=0,12 \text{ W/m}^2$).

Töö käigus koostati kaks võrdlushoone projekti ja temperatuurivälja arvutuste teostamiseks vajalikud tarindite liitekohtade sõlmejoonised. Kehtivate standardite järgi ja Therm temperatuurivälja arvutusprogrammi abil arvutati kõikide piirdetarindite ja nende põhiliste liitekohtade soojuslähivused. Saadud tulemuste põhjal leiti mõlema hoone välispiirde summaarne soojuserikadu kütava pinna ruutmeetri kohta ja piirde soojuslähivusest ning õhu infiltratsioonist põhjustatud soojuskadu. Therm programmis kasutatud lähteandmete ja tulemuste põhjal arvutati liitekohtade temperatuuriindeksid. Võrdlushoonete piirdetarindite kondensatsioonirisk määrati Glaseri meetodil.

Mõlema võrdlushoone soojuserikadude jaotus piirdetarindite (tarind ilma külmasillata) ja külmasildade kohta oli samas proportsioonis: SIP-hoonel vastavalt 83% ja 17% välispiirete summaarsest soojuserikaost, puithoonel samad näitajad vastavalt 86% ja 14%.

Piirdetarindite kandekonstruksiooni põhimõttelisest erinevusest tulenevalt sisaldab puithoone soojustuse ristlõige oluliselt rohkem puitmaterjali kui SIP-hoone (seinte puhul vahe ca 7,5% ja katusekonstruksiooni puhul 5,6%, kordades väljendatuna erinevused vastavalt 9 ja 2,7 korda). Eelkirjeldatust tulenevalt erineb tarindite soojuslähivus seinte puhul 33% ja katuste puhul 38% SIP-hoone kasuks. Kõik piirdetarindite soojuslähivused vastavad Eesti energiatõhususe miinimumnõuetes sätestatule. Piirdetarinditest tulenev soojuserikadu (ilma infiltratsiooni ja külmasildadeta) SIP-hoonel 57,54 K/W ja puithoonel 66,64 K/W. SIP-hoone piirdetarindite soojuskaod 9,1 W/K ehk 13,1% madalamad kui puithoonel.

Piirdetarindite liitekohtade arvutamiseks kasutati Therm temperatuurivälja arvutusprogrammi, mille abil leiti iga konkreetse liitekohta arvutusulatust läbiv soojusvool. Soojusvoolu ja liituvate tarindite soojuslähivuste abil leiti liitekohtade joonsoojuslähivus. Piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivused olid puithoonel madalamad kui SIP-hoonel, erinevused olenevalt positsioonist 0,01-0,02 ühikut. Erinevus tuleneb kahest põhjusest: a) SIP-hoone konstruktiivsest eripärast, kus mitmetes tarindi liitekohtades esineb sõlme lähistavaid, otse väliskeskkonnast sisekeskkonda sisenevaid, puitelemente; b) puitkarkasshoone seina soojuslähivus on kõrgem kui SIP-hoonel ja seega on külmasildade mõju hoone piirdetarinditele väiksem. Võrreldes Energiatõhususe arvutamise meetodikas toodud soovituslike joonsoojuslähivuse väärtustega olid võrdlushoonete väärtused oluliselt kõrgemad. Joonsoojuslähivustest tulenev soojuskadu SIP-hoonel 12,09 W/K ja puithoonel 10,55 W/K. SIP-hoone joonsoojuslähivusest tulenevad soojuskaod 1,54 W/K ehk 2,2% kõrgemad kui puithoonel.

Summaarne piirdetarinditest (ilma infiltratsioonita) tulenev soojuserikadu oli SIP-hoonel 69,62 K/W ja puithoonel 77,18 K/W. SIP-hoone välispiirete (ilma infiltratsioonita) summaarne soojuserikadu 7,56 W/K ehk 10,9% väiksem kui puithoonel. Välispiirete summaarne soojuserikadu (sh infiltratsioon) SIP-hoonel 101 K/W ja puithoonel 108,55 K/W. Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta vastavalt 0,64 W/(m²K) ja 0,68 W/(m²K). Piirete soojuslähivustest ja õhu infiltratsioonist tulenev soojuskadu SIP-hoonel 64,33 kWh/m²a ja puitkarkasshoonel 69,14 kWh/m²a. Arvutustulemustest järeldub, et SIP-hoone piirdetarindite soojuslähivusest tingitud soojuskadu on 7,5% madalam kui puithoonel.

Autori arvates ei ole magistritöös saadud SIP-hoone 7,5% madalam soojuserikadu piisav argument eelistamiseks SIP-hoonet puithoonele ja magistritöös esitatud lähteandmete ning tulemuste juures SIP-hoonele Eesti ehitusturul perspektiivi ei näe. Välismaiste kirjandusallikate andemetel peitub SIP-hoone eelis puithoone ees just majakarbi paremas õhupidavuses. Kahjuks on reaalsete objektide mõõdistusi ja omavahel võrreldavaid õhupidavuse katseid tehtud väga vähe.

SIP-paneelide puhul võiks tulevikus uurida järgmisi teemasid: a) piirdetarindite õhupidavus katsehoone baasil, b) kuidas lahendada tarindite liitekohtasid läbivate külmasildadeta (võimalik lahendus: SIP-paneeli katmine täiendava soojustuskihiga ja selle

kulutõhusus) c) SIP-hoone maksumus Eesti tingimustes ja selle võrdlus puitkarkasshoonega. Eelnimetatud teemade lahendamisel võib kooruda mõni tugev argument SIP-paneelide kasutuselevõtuks Eesti ehitusturul, seda eriti just peagi rakenduvate liginullenergiahoonete nõuete valguses.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Euroopa Komisjon. 2020 climate & energy package. [Veebileht] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en (10.01.2017).
2. EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2012/27/EL. Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu. Strasbourg : Euroopa Liidu Teataja, 2010. a. Strasbourg : Euroopa Liidu Teataja [veebileht] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=celex%3A32012L0027> (19.01.2018).
3. EUROOPA PARLAMENDI JA NÕUKOGU DIREKTIIV 2010/31/EL. Euroopa Parlament ja Euroopa Liidu Nõukogu. Strasbourg : Euroopa Liidu Teataja, [veebileht] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/ALL/?uri=CELEX:32010L0031> (19.01.2018).
4. Energy Efficiency Status Report 2012. European Commission. Luxembourg : Publications Office of the European Union. [veebileht] <https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/energy-efficiency-status-report-2012.pdf> (20.01.2018).
5. Statistikaamet. [veebileht] www.stat.ee. (15.01.2018).
6. European Environment Agency. European Environment Agency. [veebileht] https://europa.eu/european-union/about-eu/agencies/eea_en (21.01.2018).
7. **Kalamees, T; Tark, T** (2012). Madalenergia- ja liginullenergiahoone kavandamine. Juhend väikeelamute projekteerijale, ehitajale ja tellijale. Tallinn (05.02.2018).
8. **Kalamees, T.** Õppematerjal Ehitusfüüsika I osa lk 1-30. [veebileht] https://www.ttu.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika__I_osa_T_Kalamees.pdf (07.03.18).
9. EVS 908-1:2016. Hoone piirdetarindi soojuslähivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev lähipaistmatu piire. (2016). Tallinn : Eesti Standardikeskus
10. Liginullenergia eluhooded. Piirdetarindite liitekohtade joonsoojuslähivuse arvutus. Tallinna Tehnikaülikool. (2017). Tallinn : KredEx.
11. **Kalamees, T.** Õppematerjal. Ehitusfüüsika II osa lk 31-78. [veebileht] https://www.ttu.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika__II_Osa_T_Kalamees.pdf (08.03.18)
12. **Gagnon, Mark A. and Adams, Roy D. A.** (1999) Marketing Profile of the U.S. Structural Insulated Panel Industry. *Forest Product Journal*, 1999. Vol. 49, 7/8, pp. 31-35.
13. **Sherwood, Gerald E.** (1994). Time is Ripe for Structural Insulated Panels. *Automated Builder*, 1994. a., Vol 31, No 10, lk 22-23.

14. **Morley, M.** (2000). Building With Structural Insulated Panels (SIPs): Strength and Energy Efficiency Through Structural Panel Construction. Newton : Publishers Group West.
15. **Seward, A.** (2012) Simply SIPs: Before Specifying Structural Insulated Panels in Their Projects, Architects Must Understand the Potential Benefits and Shortcomings of the System. - *Architect the AIA Magazine*. September 2012, lk 88-100.
16. The Federation of American Scientists. Expanding the Scope and Market of SIP Technologies: A History of SIPs and CSIP Manufacturing, Construction, and Market Issues. [veebileht] <http://fas.org/programs/energy/btech/> (03.03.2018).
17. General Panel Corporation. What are SIPs. [veebileht] <http://www.generalpanel.com/downloads/whataresips.pdf> (03.03.18)
18. **Bitzer, T.** (1997). Honeycomb Technology. Dordrecht : Springer Netherlands. 233 p.
19. **Bruffey, N ja Shiu, W.** (2016) Predicting flexural strength of composite honeycomb sandwich panels using mechanical models of face sheet sompressive strength: BSc. California Polytechnic State University. San Luis Obispo.
20. Ro Homme Timmerwerk. [veebileht] <http://www.ro-home-timmerwerk.nl/bouwen-met-sip-panelen/> (10.03.2018)
21. R-Control. Construction Manual. [veebileht] <https://www.r-control.com/design-resources-2/> (18.02.18).
22. **Rungthonkit, P.** (2012). Structural behaviour of Structural Insulated Panels (SIPs). Doctoral Thesis. University of Birmingham. Birmingham.
23. **Zenkert, D.** (1995). Introduction to Sandwich Construction. Engineering Materials Advisory Services Ltd.
24. **Simon, K.** Whole Building Design Guide. [veebileht] <http://www.wbdg.org/resources/structural-insulated-panels-sips> (15.03.18)
25. **Kermani, A.** (2006) Performance of structural insulated panels. - *Structures and Buildings*. February 2006, Issue SB1, pp 13-19.
26. **Meis, A.** The True Cost of SIPs: A Comprehensive Tool for Comparing the Price of Residential Structural Insulated Panel and Stick Frame Construction. Bachelor Thesis. University of Colorado Boulder. Boulder.
27. **Christjanson, P.** (2007) Polümeermaterjalid II. Tallinn : TTÜ Kirjastus.
28. **Aldrich, Robb A, Arena, L ja Zoeller, W.** (2010). Practical Residential Wall Systems: R-30 and Beyond. U.S. Dept. of Energy. Washington D.C.
29. R-Control. Construction Manual. R-Control Structural Insulated Panels. [veebileht] <https://www.r-control.com/?pdf=R-Control-SIP-Construction-Manual.pdf&id=2351> (10.01.18).

30. **Shaw, T.** (2001). Side-by-Side Study Proves SIP Advantage. Brock University study quantifies superior thermal performance of SIPs. [veebileht] <http://magsippanel.com/wp-content/themes/blankslate/media/MagSip-Advantages.pdf> (19.03.18).
31. **Mullens, Michael A., Arif M.** (2006). Structural Insulated Panels: Impact on the Residential Construction Process. - *Journal of Construction Engineering and Management*. Volume 132, Issue 7 (July).
32. BASF. (2008). Energy Efficiency and Affordability. - *Building Engineer*. Volume 83, Issue 2, pp 28-29.
33. **Ledford, B.** (2010). Comparison of Conventional light-framed wood construction and Structural Insulated Panels. Msc Thesis. Kansas City University. Kansas.
34. **Hodgson, J.** Bring it all together with SIPs.
35. Heating and Blower Door Test of the Rooms for the SIPA/Reiker Project. (2002). Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge : U.S. Department of Energy.
36. **Kosny, J, Desjarlais, A ja Christian, J.** (1999). Whole Wall Rating/Label for Structural Insulated Panels: Steady-State Thermal Analysis. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge.
37. EVS-EN ISO 6946:2017. Hoonete piirdetarindid ja komponendid. Soojustakistus ja soojusläbivus. Arvutusmeetodid. (2017) Tallinn : Eesti Standardikeskus.
38. EVS-EN ISO 13370:2017. Hoonete soojuslik toimivus. Soojuslevi pinnasesse. Arvutusmeetodid. (2017). Tallinn : Eesti Standardikeskus.
39. KredEx. Energiatõhususest. Kraadpäevad. [veebileht] <http://kredex.ee/energiatohususest/kraadpaevad-4/> (15.04.18).
40. EVS-EN ISO 10211:2017. Külmasillad hoones. Soojusvoolud ja pinnatemperatuurid. Detailed arvutused. (2017). Tallinn : Eesti Standardikeskus.
41. Berkeley Lab. Windows & Daylighting. Building Technology & Urban System. [Veebileht] <https://windows.lbl.gov/software/therm>. (19.01.18).
42. **Järviste, M.** (2014). Energiatõhususe aspektid Boe mõisahoonest restaureerimisel. Tartu : Tallinna Tehnikaülikool.
43. Hoonete energiatõhususe arvutamise meetodika. Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrus. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/119012018007> (01.05.18)
44. **Piirfeld, A.** Soojustatud välisseina hingamine ja selle arvutusmeetodika. [veebileht] http://www.estplast.ee/files/u2/Fassaadide_hingamise_arvutus.pdf (21.04.18)
45. **Just, E., Just, A.** (2015). Puitkonstruktsioonid. [veebileht] https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste_projekteerimise_instituut/Oppematerjalid/puit_arhitektid/Arh_Puit_2015.pdf (20.04.2018).

LISAD

Lisa 1: Välispiirete soojuslähivuste arvutused

Lisa 1.1. SIP välissein: (Laudis 21mm, distantisliist 22x50 mm/õhkvahe, niiskustõkke kile, OSB 15 mm, EPS 60 Silver 245 mm, OSB 15 mm, õhkvahe 50 mm, tulekindel kips GKF 15mm)

Soojustuse sektsiooni soojustakistus vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustussektsioon}} = 0,13 + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,245}{0,032} + \frac{0,015}{0,13} + 0,16 + \frac{0,015}{0,25} + 0,13 = 8,36 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Paneelide vahelise liitekohta sektsiooni soojustakistus vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{liitekoht}} = 0,13 + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,215}{0,032} + \frac{0,015}{0,13} + 0,16 + \frac{0,015}{0,25} + 0,13 = 7,54 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus vastavalt valemile (5):

$$R_{\text{tot;upper}} = \frac{1160 + 90}{\frac{1160}{8,36} + \frac{90}{7,54}} = 8,30 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Mittehomogeensete materjalikihtide soojustakistused arvutatakse järgmiste valemite järgi:

15 mm paksuse soojustuse kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{15 \text{ mm soojustu / OSB}} = \frac{1160 + 90}{\frac{1160}{\left(\frac{0,015}{0,032}\right)} + \frac{90}{\left(\frac{0,015}{0,13}\right)}} = 0,38 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus arvutatakse valemi (6) järgi:

$$R_{\text{tot;lower}} = 0,13 + \frac{0,015}{0,13} + 0,38 + \frac{0,215}{0,032} + 0,38 + \frac{0,015}{0,032} + 0,16 + \frac{0,015}{0,25} + 0,13 = 8,19 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus arvutatakse valemi (4) järgi:

$$R_{\text{tot}} = \frac{8,30 + 8,24}{2} = 8,24 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Suhteline arvutusviga arvutatakse valemi (8) järgi:

$$e = \frac{8,30 - 8,19}{2 \cdot 8,24} \cdot 100\% = 0,67\%$$

Piirde soojuslähivus U arvutatakse valemiga (1) ja ümardatakse kahe kohani peale koma:

$$U = \frac{1}{8,24} = 0,12 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Lisa 1.2. Puit välissein: Laudis 21 mm, distanttsliist 22x50 mm/õhkvahe, Tuuletõkkeplaat Isoplaat 12 mm, mineraalvill Knauf Naturboard 032 200 mm (50x200 mm puitkarkassi vahel, s. 600mm), aurutõkkekile 0,15 mm, mineraalvill Knauf Naturboard 032 50 mm (50x50 mm horisontaalse puitroovi vahel, s. 600 mm), kipsplaat GKB 12,5mm.

Soojustuse sektsiooni soojustakistus vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,015}{0,049} + \frac{0,200}{0,032} + \frac{0,50}{0,032} + \frac{0,0125}{0,25} + 0,13 = 8,37 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Sõrestiku postide sektsiooni soojustakistus vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,13 + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,2}{0,13} + \frac{0,050}{0,13} + \frac{0,015}{0,23} + 0,13 = 2,48 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus vastavalt valemile (5):

$$R_{\text{tot;upper}} = \frac{550+50}{\frac{550}{8,37} + \frac{50}{2,48}} = 6,98 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Mittehomogeensete materjalikihtide soojustakistused arvutatakse järgmiste valemite järgi:

200 mm paksuse soojustuse kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{200\text{mm soojustus/sõrestik}} = \frac{550 + 50}{\frac{550}{\left(\frac{0,2}{0,032}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,2}{0,13}\right)}} = 4,98 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

50 mm paksuse soojustuse kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{50\text{mm soojustus/sõrestik}} = \frac{550 + 50}{\frac{550}{\left(\frac{0,05}{0,032}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,05}{0,13}\right)}} = 1,25 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus arvutatakse valemi (6) järgi:

$$R_{\text{tot;lower}} = 0,13 + \frac{0,015}{0,049} + 4,98 + 1,25 + \frac{0,013}{0,25} + 0,13 = 6,85 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus arvutatakse valemi (4) järgi:

$$R_{\text{tot}} = \frac{6,98 + 6,85}{2} = 6,92 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Suhteline arvutusviga arvutatakse valemi (8) järgi:

$$e = \frac{6,98 - 6,85}{2 \cdot 6,92} \cdot 100\% = 0,94\%$$

Piirde soojuslähivus U arvutatakse valemiga (1) ja ümardatakse kahe kohani peale koma:

$$U = \frac{1}{6,92} = 0,15 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

200 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur arvutatakse valemi (11) järgi:

$$\Delta U_{g \text{ 200 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \cdot \left(\frac{4,98}{6,92}\right)^2 = 0,0052 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

50 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur arvutatakse valemi (11) järgi:

$$\Delta U_{g \text{ 50 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \cdot \left(\frac{1,25}{6,92}\right)^2 = 0,00033 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

200 mm paksuse soojustuse kihi sisese mikrokonvektsiooni parandustegur arvutatakse valemi (12) järgi:

$$\Delta U_{a \text{ 200 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \cdot \left(\frac{4,98}{6,92}\right)^2 = 0,0026 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

50 mm paksuse soojustuse kihi sisese mikrokonvektsiooni parandustegur arvutatakse valemi (12) järgi:

$$\Delta U_{g \text{ 50 mm soojustus/sõrestik}} = 0,005 \cdot \left(\frac{1,25}{6,92}\right)^2 = 0,00016 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Hoone soojakadude arvutuses kasutatav korregeeritud piirdetarindi soojuslähivus leitakse valemi (10) järgi:

$$U_c = 0,15 + 0,0052 + 0,00033 + 0,0026 + 0,00016 = 0,16 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Lisa 1.3. SIP katusekonstruktsioon: Katuseplekk 0,5 mm, aluslaudis 32x100 mm, distantssliist 22x50 /õhkvahe, niiskustõkke kile, OSB 15 mm, EPS 60 Silver 400 mm

(STEICOjoist SJ90 talade vahel, s. 1250 mm), OSB 15 mm, õhkvahe 50 mm, tulekindel kipsplaat GKF 15mm.

Soojustuse sektsiooni soojustakistus vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,10 + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,400}{0,032} + \frac{0,015}{0,13} + 0,16 + \frac{0,015}{0,25} + 0,10 = 13,14 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

STEICOjoist puittala vöö sektsiooni soojustakistus arvutatakse vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{tala vöö sektsioon}} = 0,10 + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,310}{0,032} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,015}{0,13} + 0,16 + \frac{0,015}{0,25} + 0,10$$

$$= 11,02 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

STEICOjoist puittala talaseina sektsiooni soojustakistus arvutatakse vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{tala vöö sektsioon}} = 0,10 + \frac{0,015}{0,13} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,310}{0,18} + \frac{0,045}{0,13} + \frac{0,015}{0,13} + 0,16 + \frac{0,015}{0,25} + 0,10$$

$$= 3,06 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus vastavalt valemile (5):

$$R_{\text{tot;upper}} = \frac{1160 + 84 + 6}{\frac{1160}{13,14} + \frac{84}{11,02} + \frac{6}{3,06}} = 12,77 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Mittehomogeensete materjalikihtide soojustakistused arvutatakse järgmiste valemite järgi:

45 mm paksuse soojustuse kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{45 \text{ mm soojustus/ tala vöö}} = \frac{1160 + 90}{\frac{1160}{\left(\frac{0,045}{0,032}\right)} + \frac{90}{\left(\frac{0,045}{0,13}\right)}} = 1,15 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

310 mm paksuse soojustuse kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{310 \text{ mm soojustus/ tala sein}} = \frac{1244 + 6}{\frac{1244}{\left(\frac{0,310}{0,032}\right)} + \frac{6}{\left(\frac{0,310}{0,18}\right)}} = 9,48 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus arvutatakse valemi (6) järgi:

$$R_{\text{tot;lower}} = 0,10 + \frac{0,015}{0,13} + 1,15 + 9,48 + 1,15 + \frac{0,015}{0,13} + 0,16 + \frac{0,015}{0,25} + 0,10 = 12,43 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus arvutatakse valemi (4) järgi:

$$R_{\text{tot}} = \frac{12,77 + 12,43}{2} = 12,6 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Suhteline arvutusviga arvutatakse valemi (8) järgi:

$$e = \frac{12,77 - 12,43}{2 \cdot 12,6} \cdot 100\% = 1,35\%$$

Piirde soojuslähivus U arvutatakse valemiga (1) ja ümardatakse kahe kohani peale koma:

$$U = \frac{1}{12,6} = 0,08 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Lisa 1.4. Puit katusekonstruktsioon: Katuseplekk 0,5 mm, aluslaudis 32x100 mm, distantssliist 22x50 mm/õhkvahe, niiskustõkke kile, tuuletõkkeplaat Isoplaat 12 (puittalade vahel), mineraalvill Knauf Naturboard 032 350 mm (50x400 puittalade vahel, s. 600mm), aurutõkkekile 0,15 mm, mineraalvill Knauf Naturboard 032 50 mm (50x50 mm horisontaalse puitroovi vahel, s. 400 mm), kipsplaat GKB 12,5mm.

Soojustuse sektsiooni soojustakistus vastavalt valemile (2):

$$R_{\text{soojustuse sektsioon}} = 0,10 + \frac{0,012}{0,049} + \frac{0,4}{0,032} + \frac{0,0125}{0,25} + 0,1 = 13,00 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Sõrestiku postide sektsiooni soojustakistus vastavalt valemile (4). Suurendame laeroovidest tulevat komponenti 1,5 kordselt kuna laeroovide paigalduse tihedus on 1,5 korda suurem sarikate omast (laeroovide samm 400 mm, sarikate samm 600 mm (600 mm / 400 mm=1,5):

$$R_{\text{sõrestiku sektsioon}} = 0,10 + \frac{0,362}{0,13} + 1,5 \cdot \frac{0,05}{0,13} + \frac{0,0125}{0,25} + 0,1 = 3,61 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kogusoojustakistuse ülemine piirväärtus vastavalt valemile (5):

$$R_{\text{tot;upper}} = \frac{550+50}{\frac{550}{13,00} + \frac{50}{3,61}} = 10,68 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Mittehomogeensete materjalikihtide soojustakistused arvutatakse järgmiste valemite järgi:

12 mm paksuse tuuletõkkeplaadi kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{12mm \text{ tuuletõkke/sõrestik}} = \frac{550 + 50}{\frac{550}{\left(\frac{0,012}{0,049}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,012}{0,130}\right)}} = 0,22 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

350 mm paksuse soojustuse kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{350mm \text{ soojustus/sõrestik}} = \frac{550 + 50}{\frac{550}{\left(\frac{0,350}{0,032}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,350}{0,130}\right)}} = 8,71 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

50 mm paksuse soojustuse kihi soojustustakistus arvutatakse valemi (7) järgi:

$$R_{50mm \text{ soojustus/sõrestik}} = \frac{350 + 50}{\frac{350}{\left(\frac{0,050}{0,032}\right)} + \frac{50}{\left(\frac{0,050}{0,130}\right)}} = 1,13 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Kogusoojustakistuse alumine piirväärtus arvutatakse valemi (6) järgi:

$$R_{\text{tot;lower}} = 0,10 + 0,22 + 8,71 + 1,13 + \frac{0,013}{0,25} + 0,10 = 10,31 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Piirdetarindi kogusoojustakistus arvutatakse valemi (4) järgi:

$$R_{\text{tot}} = \frac{10,68 + 10,31}{2} = 10,50 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Suhteline arvutusviga arvutatakse valemi (8) järgi:

$$e = \frac{10,68 - 10,31}{2 \cdot 10,50} \cdot 100\% = 1,76\%$$

Piirde soojusläbivus U arvutatakse valemiga (1) ja ümardatakse kahe kohani peale koma:

$$U = \frac{1}{10,50} = 0,10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

350 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur arvutatakse valemi (11) järgi:

$$\Delta U_{g \text{ 350 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \cdot \left(\frac{8,71}{10,50}\right)^2 = 0,0069 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

50 mm paksuse soojustuse/sõrestiku kihi õhupilude parandustegur arvutatakse valemi (11) järgi:

$$\Delta U_{g \text{ 50 mm soojustus/sõrestik}} = 0,01 \cdot \left(\frac{1,13}{10,5}\right)^2 = 0,00012 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Piirde soojusläbivus U arvutatakse valemiga (1) ja ümardatakse kahe kohani peale koma:

$$U_c = 0,10 + 0,0069 + 0,00012 = 0,11 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Lisa 1.5. Soojuslevi pinnasesse

Põranda tunnusmõõde arvutatakse valemi (13) järgi:

$$B = \frac{93,6}{0,5 \cdot P} = 4,81$$

Põranda ekvivalentne kogupaksus leitakse valemi (14) järgi:

$$d_f = d_{we} + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{f;sog} + R_{se}) = 19,03m$$

Tulenevalt täidetud tingimusest $d_f \geq B$ ($19,03 \geq 4,81$) arvutatakse põranda soojuslähivus valemi (16) järgi:

$$U_{fg;sog} = \frac{2}{0,457 \cdot 4,81 + 19,03} = 0,09 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Lisa 1.6. SIP-hoone välispiirete soojuskadu:

Välispiirete summaarne soojuserikadu leitakse valemiga (19):

$$H_e = 57,54 + 12,09 + 1,2 \cdot 1005 \cdot 0,026 = 100,99 \frac{W}{K}$$

Infiltratsiooni õhuhulk leitakse valemi (20) järgi:

$$V_{inf} = \frac{6 \cdot 372}{3,6 \cdot 24} = 0,026 \frac{m^3}{s}$$

Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta arvutatakse valemi (21) järgi:

$$\frac{H_e}{A_{köetav}} = \frac{100,99}{159} = 0,61 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist tulenevad soojuskaod arvutatakse valemi (22) järgi:

$$\frac{100,99 \cdot 4220 \cdot 24}{159} = 61,25 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$$

Lisa 1.7. Puithoone välispiirete soojuskadu:

Välispiirete summaarne soojuserikadu leitakse valemiga (19)

$$H_e = 66,64 + 10,55 + 1,2 \cdot 1005 \cdot 0,026 = 108,55 \frac{W}{K}$$

Infiltratsiooni õhuhulk leitakse valemi (20) järgi:

$$V_{inf} = \frac{6 \cdot 372}{3,6 \cdot 24} = 0,026 \frac{m^3}{s}$$

Välispiirete summaarne soojuserikadu köetava pinna kohta arvutatakse valemi (21) järgi:

$$\frac{H_e}{A_{köetav}} = \frac{108,55}{159} = 0,65 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

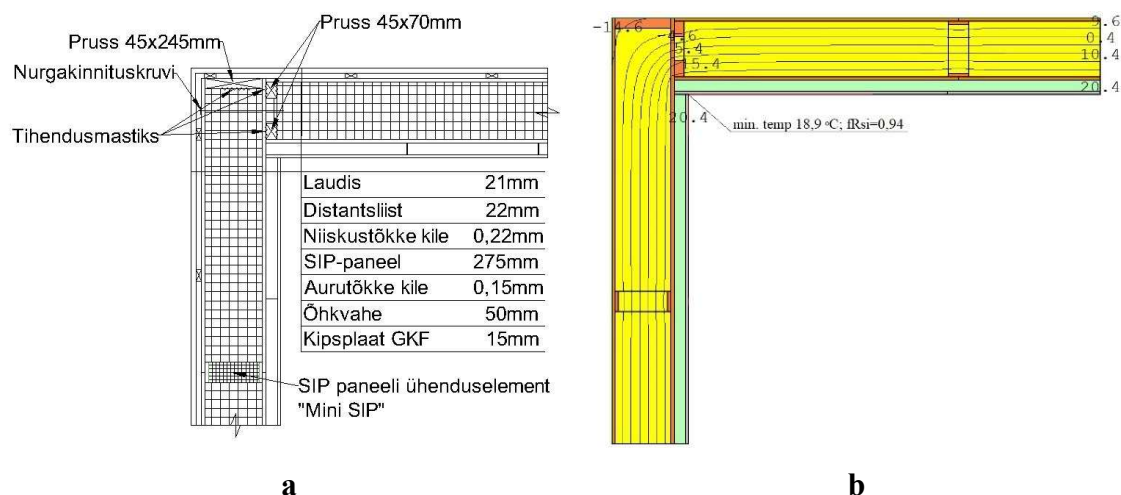
Piirete soojusjuhtivusest ja õhu infiltratsioonist tulenevad soojuskaod arvutatakse valemi (22) järgi:

$$\frac{108,55 \cdot 4220 \cdot 24}{159} = 69,14 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$$

Lisa 2: Külmasildade analüüs

Lisa 2.1. SIP-hoone külmasildade analüüs

SIP-hoone välisnurga liitekohast tulenev joonsoojusläbivus tabelis 19 ja liitekoha sõlm joonisel 22:



Joonis 22: SIP-hoone välisnurga liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmudel;

Tabel 19: SIP- hoone põrand pinnasel - välissein liitekoha joonsoojusläbivuse arvutusandmed

| Välisnurk | | |
|--------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,452 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1226 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1812 | mm |
| U _j , 2. sein | 0,1226 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. sein | 1537 | mm |
| Mín temp | 18,9 | C |
| fRSI | 0,94 | C |
| Soojusvool | 16,26 | W |
| ψ | 0,05 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,452 - (0,1226 \cdot 1812 + 0,1226 \cdot 1537) / 1000 = 0,05 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

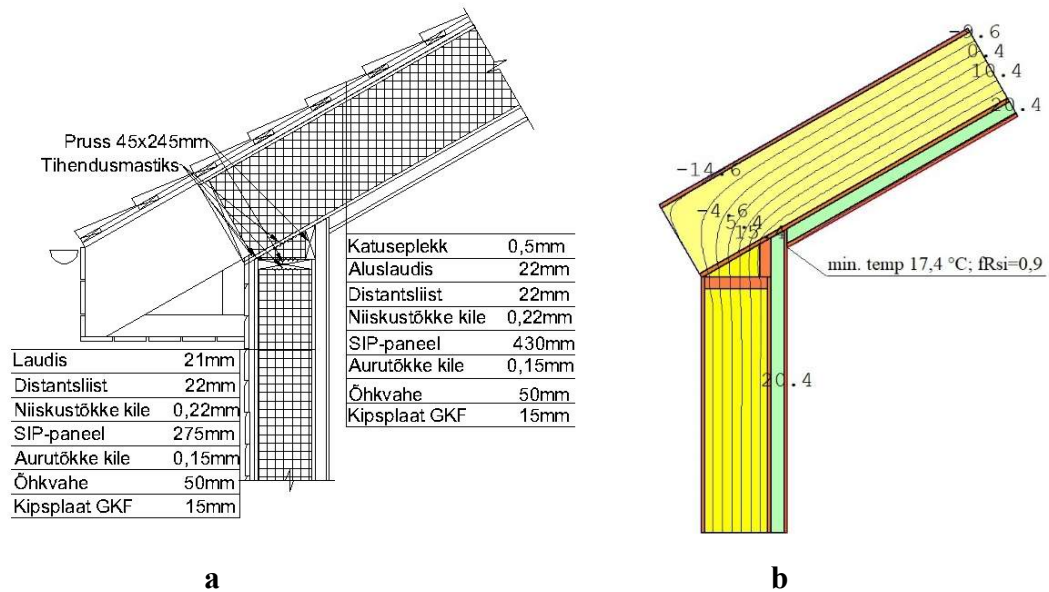
SIP-hoone välissein-katus tulenev joonsoojusläbivus.

Välissein – katuse ühendusest tulenev soojusläbivus on arvestatud võrdsena välisnurga soojusläbivusega kuna tegemist on analoogsete sõlmedega.

$$\Psi = 0,05 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Räästasõlme liitekohast tulenev joonsoojusläbivus tabelis 20 ka liitekoha sõlm joonisel

23:



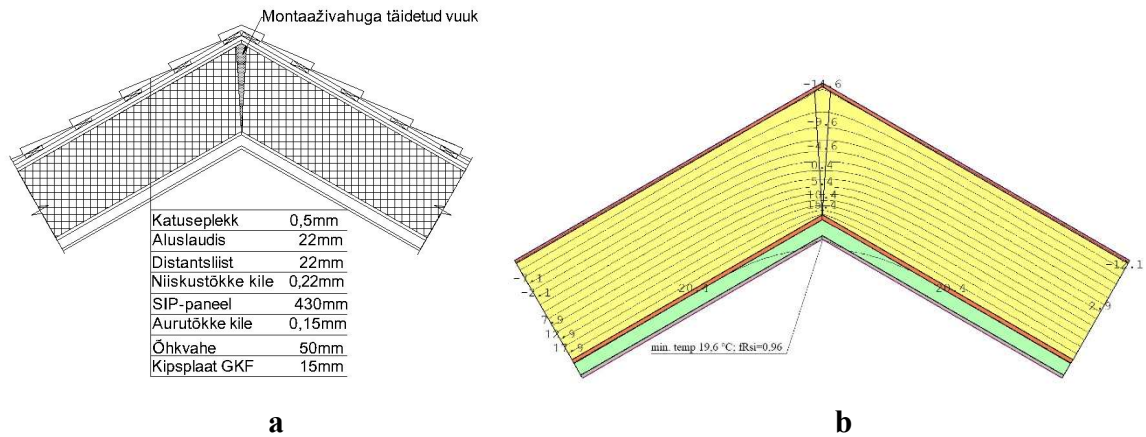
Joonis 23: SIP-hoone räästasõlme liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmodel;

Tabel 20: SIP- hoone räästasõlme liitekoha joonsoojusläbivuse arvutusandmed

| Räästasõlm | | |
|---------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,287 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1226 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1118 | mm |
| U _j , 2. katus | 0,0789 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. katus | 1037 | mm |
| Min temp | 17,4 | C |
| fRSI | 0,90 | C |
| Soojusvool | 10,32 | W |
| ψ | 0,07 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,287 - (0,1226 \cdot 1118 + 0,0789 \cdot 1037) / 1000 = 0,07 \text{ W/(m·K)}$$

SIP-hoone harjasõlme liitekohast tulenev joonsoojuslähivus tabelis 21 ja liitekohta sõlm joonisel 24::



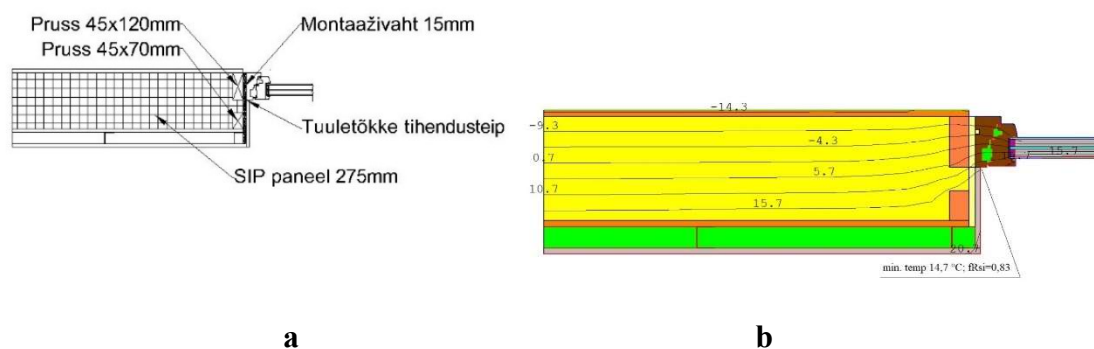
Joonis 24: SIP-hoone harjasõlme liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmudel;

Tabel 21: SIP- hoone harjasõlme liitekohta joonsoojuslähivuse arvutusandmed

| Harjasõlm | | |
|---------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,182 | W |
| U _j , 1. katus | 0,0789 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. katus | 1000 | mm |
| U _j , 2. katus | 0,0789 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. katus | 1000 | mm |
| Min temp | 19,6 | C |
| fRSI | 0,96 | C |
| Soojusvool | 6,53 | W |
| ψ | 0,03 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,182 - (0,0789 \cdot 1000 + 0,0789 \cdot 1000) / 1000 = 0,03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

SIP-hoone aknasõlme liitekohast tulenev joonsoojuslähivus tabelis 22 ja liitekohta sõlm joonisel 25:



Joonis 25: SIP-hoone aknasõlme liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmudel;

Tabel 22: SIP- hoone aknasõlme liitekohta joonsoojuslähivuse arvutusandmed

| Aknasõlm | | |
|--------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,432 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1226 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1015 | mm |
| U _j , 2. aken | 0,9456 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. aken | 294 | mm |
| Min temp | 14,7 | C |
| fRSI | 0,83 | C |
| Soojusvool | 15,55 | W |
| ψ | 0,03 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,432 - (0,1226 \cdot 1015 + 0,9456 \cdot 294) / 1000 = 0,04 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

SIP-hoone ukseõlmest tulenev joonsoojuslähivus:

Ukseõlmest tuleneva joonsoojuslähivuse võib arvestada samaväärseks aknasõlme joonsoojuslähivusega kuna tegemist on analoogsete sõlmedega.

$$\Psi = 0,03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

SIP-paneelide ühenduskohast (teostatuna „miniSIP“ ühendusega) tulenev joonsoojuslähivus tabelis 23:

Tabel 23: SIP-hoone: „mini-SIP“ ühendusega teostatud SIP-paneelide liitesõlme joonsoojuslähivus

| SIP ühendussõlm - miniSIP | | |
|---------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,154 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1216 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 625 | mm |
| U _j , 2. sein | 0,1216 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. sein | 625 | mm |
| Min temp | 19,9 | C |
| fRSI | 0,97 | C |
| Soojusvool | 5,52 | W |
| ψ | 0,01 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,154 - (0,1216 \cdot 625 + 0,1216 \cdot 625) / 1000 = 0,01 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

SIP paneelide ühenduskohast (teostatuna kahekordse 45x245 mm prussiga) tulenev joonsoojuslähivus tabelis 24:

Tabel 24: SIP-hoone: kahekordse 45x245 mm prussiga teostatud SIP-paneelide liitesõlme joonsoojuslähivus

| SIP ühendussõlm - 2 x pruss 45x245 | | |
|---------------------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,181 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1216 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 625 | mm |
| U _j , 2. sein | 0,1216 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. sein | 625 | mm |
| Min temp | 19,5 | C |
| fRSI | 0,96 | C |
| Soojusvool | 6,49 | W |
| ψ | 0,03 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,181 - (0,1216 \cdot 625 + 0,1216 \cdot 625) / 1000 = 0,03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

SIP paneelide ühenduskohast (teostatuna STEICOjoist SJ90 puittalaga) tulenev joonsoojuslähivus tabelis 25:

Tabel 25: SIP-hoone: STEICOjoist SJ 90 puittalaga teostatud SIP-paneelide liitesõlme joonsoojuslähivus

| SIP ühendussõlm - STEICO SJ90 | | |
|-------------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,161 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1216 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 625 | mm |
| U _j , 2. sein | 0,1216 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. sein | 625 | mm |
| Min temp | 19,8 | C |
| fRSI | 0,97 | C |
| Soojusvool | 5,78 | W |
| ψ | 0,01 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,161 - (0,1216 \cdot 625 + 0,1216 \cdot 625) / 1000 = 0,01 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

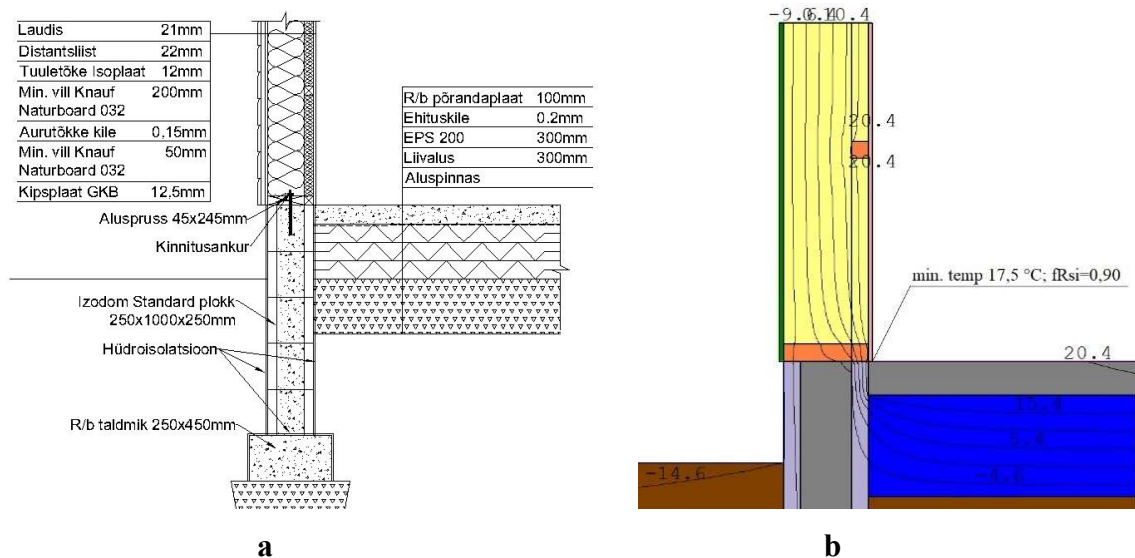
SIP-hoone liitekohtade joonsoojusläbivused tabelis 26:

Tabel 26: SIP-hoone liitekohtade joonsoojusläbivused

| Liitekoht | ψ W/(mK) |
|-------------------------------|------------------|
| Põrand-pinnasel- välissein | 0,11 |
| Välisnurk | 0,05 |
| Välissein-katus | 0,05 |
| Välissein-vahelagi | 0,09 |
| Räästasõlm | 0,07 |
| Harjasõlm | 0,03 |
| Akna seinakinnitus | 0,03 |
| Ukse seinakinnitus | 0,03 |

Lisa 2.2. Puitkarkasshoone külmasildade analüüs

Puitkarkasshoone põrand pinnasel – välissein liitekohast tulenev joonsoojusläbivus tabelis 27 ja liitekoha sõlm joonisel 26:



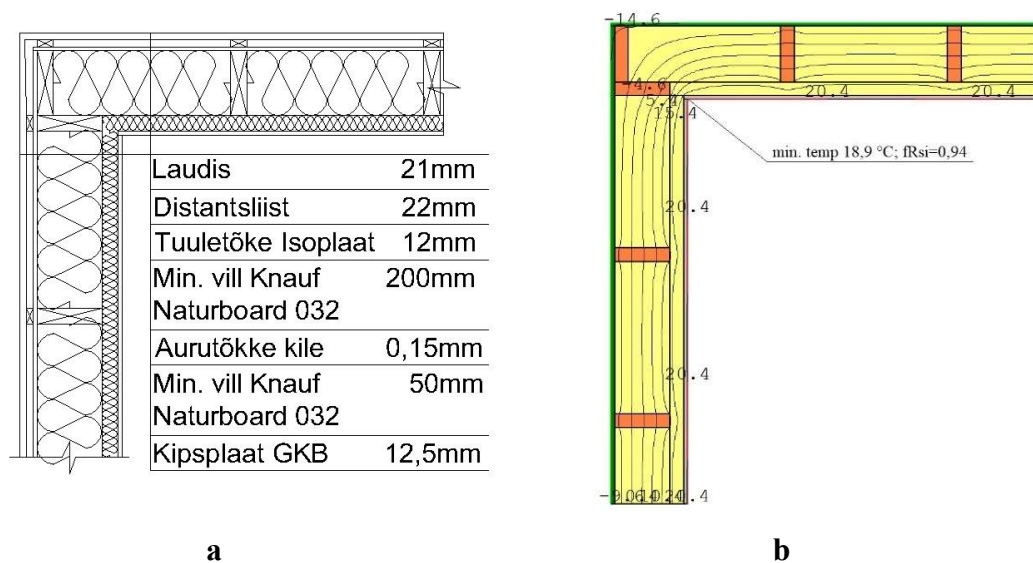
Joonis 26: Puitkarkasshoone põrand pinnasel - välissein liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmodel;

Tabel 27: Puitkarkasshoone põrand pinnasel – välissein liitekohta joonsoojusläbivuse arvutusandmed

| Põrand pinnasel - välissein | | |
|-----------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,596 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1435 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1000 | mm |
| U _j , 2. põrand | 0,0894 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. põrand | 4000 | mm |
| Min temp | 17,5 | C |
| fRSI | 0,90 | C |
| Soojusvool | 21,44 | W |
| ψ | 0,10 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,596 - (0,1435 \cdot 1000 + 0,0894 \cdot 4000) / 1000 = 0,10 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Puitkarkasshoone välisnurga liitekohast tulenev joonsoojusläbivus tabelis 28 ja liitekohta sõlm joonisel 27:



Joonis 27: Puitkarkasshoone välisnurga liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmodel;

Tabel 28: Puitkarkasshoone välisnurga liitekohta joonsoojusläbivuse arvutusandmed

| Välisnurk | | |
|--------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,411 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1435 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1262 | mm |
| U _j , 2. sein | 0,1435 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. sein | 1462 | mm |
| Min temp | 18,9 | C |
| fRSI | 0,94 | C |
| Soojusvool | 14,79 | W |
| ψ | 0,03 | W/(m·K) |

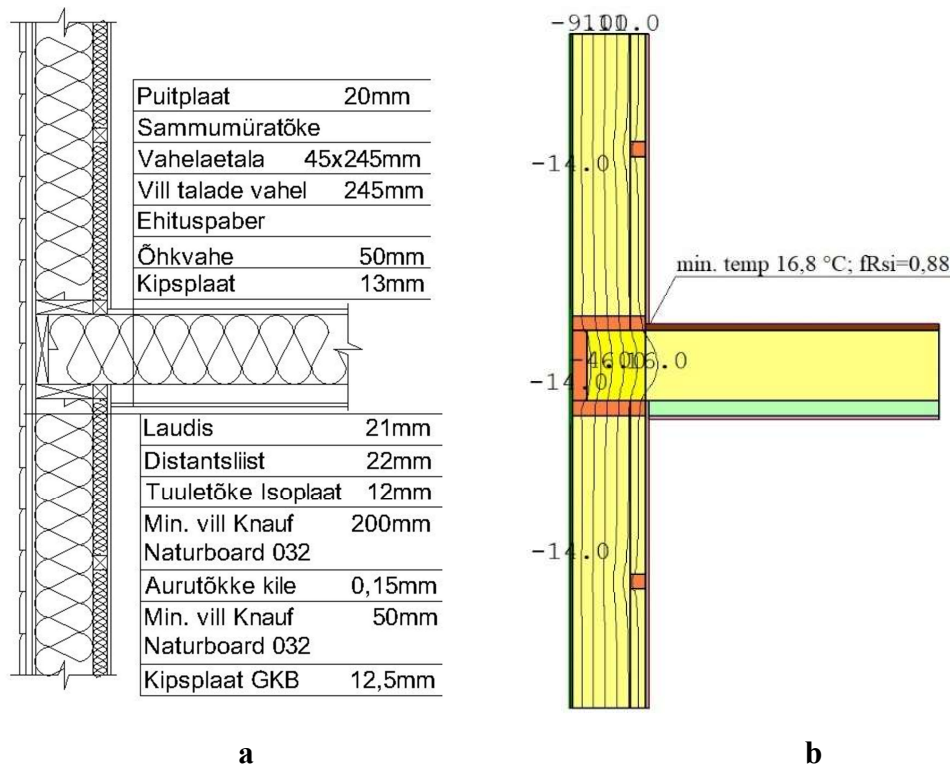
$$\Psi = 0,411 - (0,1435 \cdot 1262 + 0,1435 \cdot 1462)/1000 = 0,03 \text{ W/(m·K)}$$

Välissein-katus tulenev joonsoojusläbivus.

Välissein – katuse ühendusest tulenev soojusläbivus on arvestatud võrdne välisnurga soojusläbivusega kuna tegemist on analoogsete sõlmedega.

$$\Psi = 0,03 \text{ W/(m·K)}$$

Puitkarkasshoone välissein - vahelagi liitekohast tulenev joonsoojusläbivus tabelis 29 ja liitekohta sõlm joonisel 28:



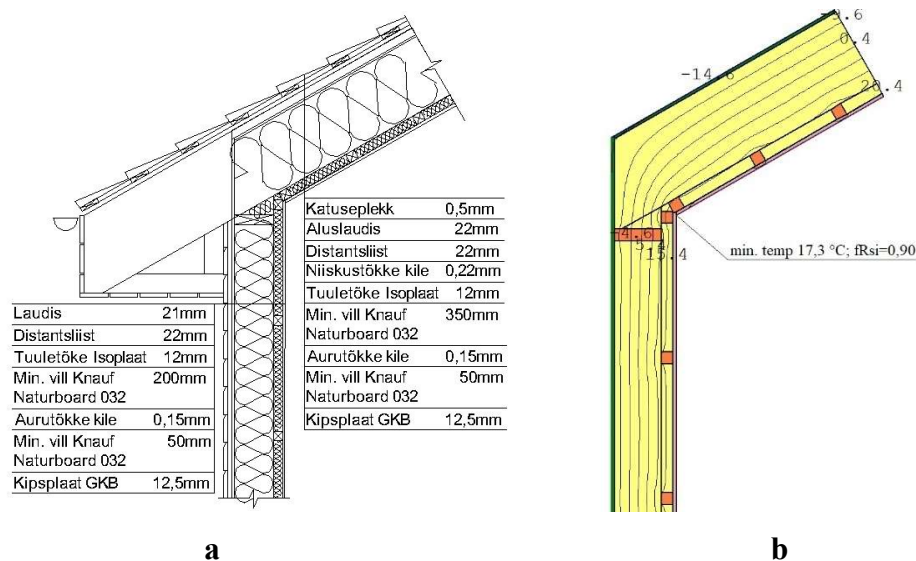
Joonis 28: Puitkarkasshoone välissein – vahelagi liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmudel;

Tabel 29: Puitkarkasshoone välissein – vahelagi liitekohta joonsoojusläbivuse arvutusandmed

| Välissein - vahelagi | | |
|--------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,361 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1435 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1000 | mm |
| U _j , 2. sein | 0,1435 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2.sein | 1000 | mm |
| Min temp | 16,8 | C |
| fRSI | 0,88 | C |
| Soojusvool | 12,99 | W |
| ψ | 0,08 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,361 - (0,1435 \cdot 1000 + 0,1435 \cdot 1000) / 1000 = 0,08 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Puitkarkasshoone räästasõlme liitekohast tulenev joonsoojusläbivus tabelis 30 liitekohta sõlm joonisel 29:



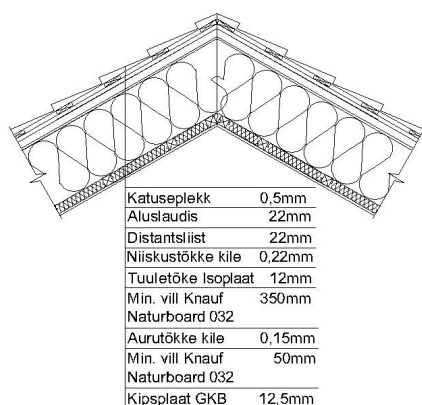
Joonis 29: Puitkarkasshoone räästasõlme liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmudel;

Tabel 30: Puitkarkasshoone räastasõlme liitekohta joonsoojuslähivuse arvutusandmed

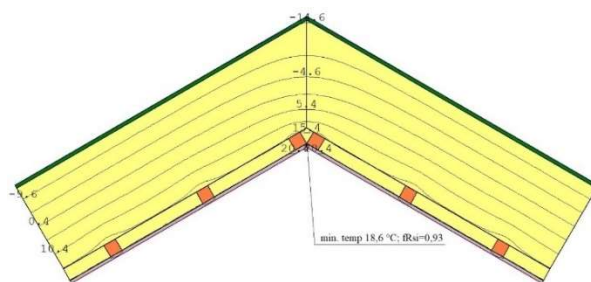
| Räastasõlm | | |
|---------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,366 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1435 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1535 | mm |
| U _j , 2. katus | 0,0934 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. katus | 1021 | mm |
| Min temp | 17,3 | C |
| fRSI | 0,90 | C |
| Soojusvool | 13,17 | W |
| ψ | 0,06 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,366 - (0,1435 \cdot 1535 + 0,0934 \cdot 1021) / 1000 = 0,06 \text{ W/(m·K)}$$

Puitkarkasshoone harjasõlme liitekohast tulenev joonsoojuslähivus tabelis 31 ja liitekohta sõlm joonisel 30:



a



b

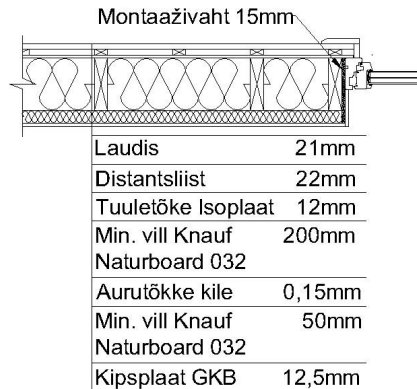
Joonis 30: Puitkarkasshoone harjasõlme liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmudel;

Tabel 31: Puitkarkasshoone harjasõlme liitekohta joonsoojuslähivuse arvutusandmed

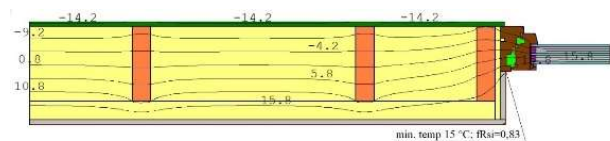
| Harjasõlm | | |
|---------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,213 | W |
| U _j , 1. katus | 0,0934 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. katus | 1018 | mm |
| U _j , 2. katus | 0,0934 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. katus | 1018 | mm |
| Min temp | 18,6 | C |
| fRSI | 0,93 | C |
| Soojusvool | 7,65 | W |
| ψ | 0,03 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,213 - (0,0934 \cdot 1018 + 0,0934 \cdot 1018) / 1000 = 0,03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Puitkarkasshoone aknasõlme liitekohast tulenev joonsoojuslähivus tabelis 32 ja liitekohta sõlm joonisel 31:



a



b

Joonis 31: Puitkarkasshoone aknasõlme liitekoht: a – sõlmejoonis; b - arvutusmodel;

Tabel 32: Puitkarkasshoone aknasõlme liitekohta joonsoojuslähivuse arvutusandmed

| Aknasõlm | | |
|--------------------------|--------|-----------------------|
| L2D | 0,488 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1435 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 1. sein | 1265 | mm |
| U _j , 2. aken | 0,9456 | W/(m ² ·K) |
| l _j , 2. aken | 294 | mm |
| Min temp | 15 | C |
| fRSI | 0,83 | C |
| Soojusvool | 17,55 | W |
| Ψ | 0,03 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,488 - (0,1435 \cdot 1265 + 0,9456 \cdot 294) / 1000 = 0,03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Puitkarkasshoone ukseõlmest tulenev joonsoojuslähivus:

Ukseõlmest tuleneva joonsoojuslähivuse võib arvestada samaväärseks aknasõlme joonsoojuslähivusega kuna tegemist on analoogsete sõlmedega.

$$\Psi = 0,03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Puitkarkass-seina karkassipostist tulenev joonsoojuslääbivus tabelis 33:**Tabel 33:** Puithoone seinä joonsoojuslääbivus karkassiposti lõikes

| Seina karkassiposti sõlm | | |
|--------------------------|--------|----------|
| L2D | 0,087 | W |
| U _j , 1. sein | 0,1232 | W/(m²·K) |
| l _j , 1. sein | 300 | mm |
| U _j , 2. sein | 0,1232 | W/(m²·K) |
| l _j , 2. sein | 300 | mm |
| Min temp | 19,9 | C |
| fRSI | 0,97 | C |
| Soojusvool | 3,10 | W |
| ψ | 0,02 | W/(m·K) |

$$\Psi = 0,087 - (0,1232 \cdot 300 + 0,1232 \cdot 300) / 1000 = 0,02 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

Puitkarkasshoone liitekohtades joonsoojuslääbivused tabelis 34:**Tabel 34:** Puithoone liitekohtade joonsoojuslääbivused

| Liitekoht | ψ W/(mK) |
|---------------------------|-------------|
| Põrand-pinnasel-välissein | 0,10 |
| Välisnurk | 0,03 |
| Välissein-katus | 0,03 |
| Välissein-vahelagi | 0,08 |
| Räästasõlm | 0,06 |
| Harjasõlm | 0,03 |
| Akna seinakinnitus | 0,03 |
| Ukse seinakinnitus | 0,03 |

Lisa 3. Temperatuuriindeksite arvutused

Temperatuuriindeksite arvutamisel kasutatud soojuslikud ääritingimused toodu tabelis 35.

Tabel 35: Temperatuuriindeksite arvutusmodeli soojuslikud ääritingimused

| Soojusliku ääritingimuse nimetus | h (W/m ² K) | t (°C) |
|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| Adiabatic | 0 | 0 |
| Exterior -15 SEIN Rs=0,13 | 7,69 | -15 |
| Exterior -15 KATUS Rs=0,1 | 10 | -15 |
| Interior 21 fRsi Rs=0,25 | 4 | 21 |

SIP-hoone põhilisemate liitekohtade temperatuuriindeksid

Soklisõlm

$$f_{Rsi} = \frac{17,8 - (-1)}{21 - (-15)} = 0,91$$

Välisnurk

$$f_{Rsi} = \frac{18,9 - (-1)}{21 - (-15)} = 0,94$$

Räästasõlm

$$f_{Rsi} = \frac{17,4 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,90$$

Välissein-vahelagi

$$f_{Rsi} = \frac{16,8 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,88$$

Harjasõlm

$$f_{Rsi} = \frac{19,6 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,96$$

Aknasõlm

$$f_{Rsi} = \frac{14,7 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,83$$

Puitkarkasshoone põhilisemate liitekohtade temperatuuriindeksid

Soklisõlm

$$f_{Rsi} = \frac{17,5 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,90$$

Välisnurk

$$f_{Rsi} = \frac{18,9 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,94$$

Räästasõlm

$$f_{Rsi} = \frac{17,3 - (-15)}{21 - (-1)} = 0,90$$

Välissein-vahelagi

$$f_{Rsi} = \frac{16,8 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,88$$

Harjasõlm

$$f_{Rsi} = \frac{18,6 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,93$$

Aknasõlm

$$f_{Rsi} = \frac{15 - (-15)}{21 - (-15)} = 0,83$$

Lisa 4. Välispiirde kondenseerumisriski arvutus Glaseri meetodiga

Kondenseerumisriski arvutustes kasutatud materjalide difusioonitakistuskonstandid ja aurutakistused on võetud tabelist 6.

LISA 4.1. SIP sein: (Laudis 21mm, distantssliist 22x50/õhkvahe, niiskustõkke kile, OSB 15mm, EPS 60 Silver 245mm, OSB 15mm, õhkvahe 50mm, tulekindel kips GKF 15mm)

Kondenseerumine

Kliimatingimused: sees 20°C ja RH = 50% → $p_i = 0,5 \cdot 2337 = 1169 \cdot 10^3$ Pa väljas
-10°C ja RH = 80% → $p_a = 0,8 \cdot 259,7 = 207,76 \cdot 10^3$ Pa

kondenseerumisperiood 90 päeva = 2160 h

Vastavalt arvutustabelile 36 ja joonisele 32 SIP seinas kondensatsioonivett ei teki.

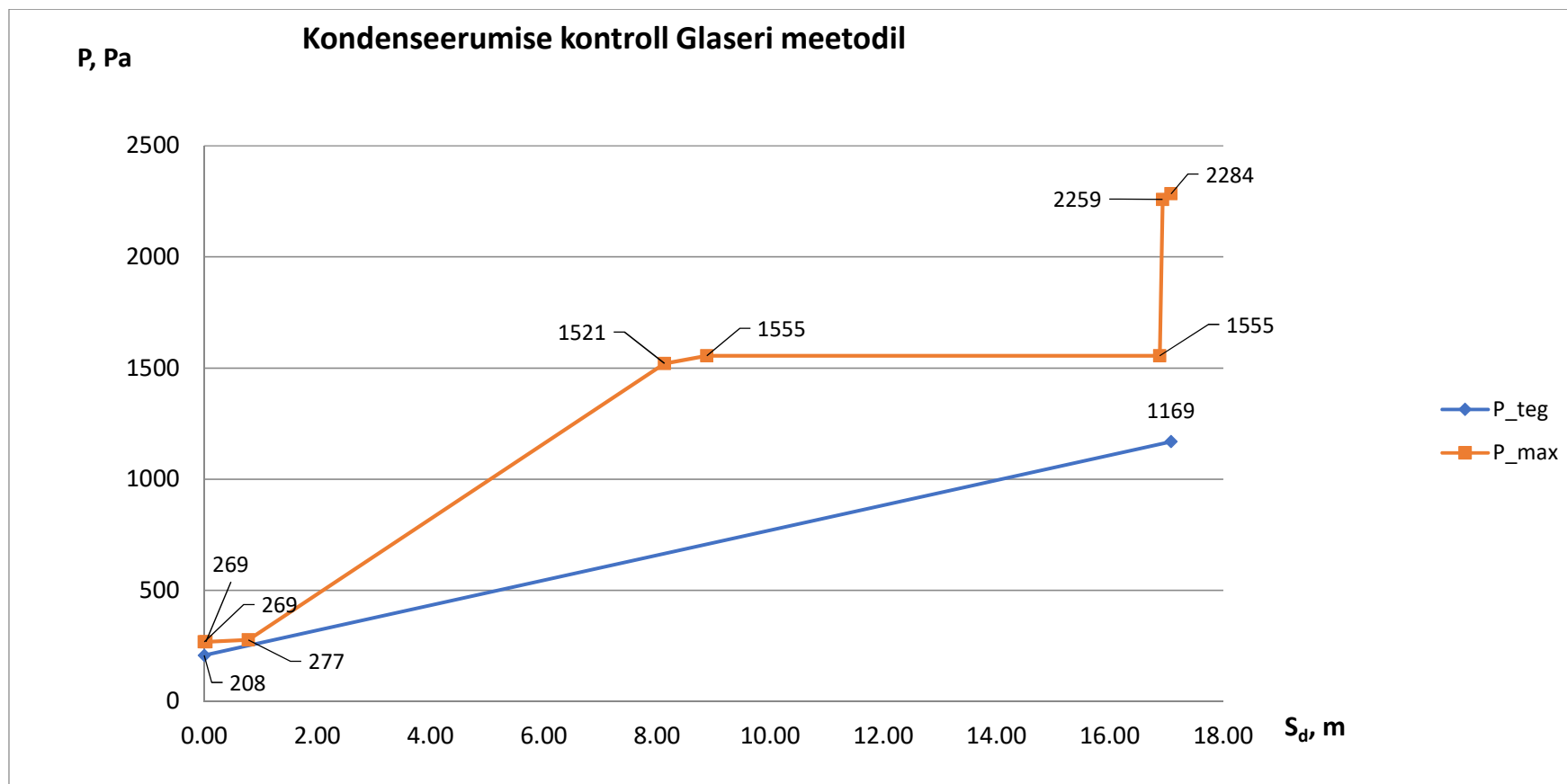
Tabel 36: SIP-seina kondenseerumisriski arvutus

| | | | | | | | | Välis-temp. | Sise-temp. | | | | | |
|-------------|-----------------------------|------------------|---------------------|----------------|------------|----------|------|-------------|------------|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| | | | | | | | | -10° C | 20° C | | | | | |
| Tarindi osa | Materjal (tihedus kg/m³) | Kihi paksus d, m | μ | S _d | λ, W/(mK) | R, m²K/W | %R | Δt | -10 | välisõhk | P _{teg} (Pa) | P _{max} (Pa) | S _d , summa | |
| Välispind | tuulutusvahega | | | | | 0,13 | 1,3 | 0,38 | -9,62 | | 208 | 269 | 0,00 | |
| Kiht 1 | Niiskustõkke kile | 0,00022 | 136 | 0,03 | 0,15 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | -9,61 | | | 269 | 0,03 | |
| Kiht 2 | OSB plaat (650), kuiv | 0,015 | 50 | 0,75 | 0,13 | 0,12 | 1,1 | 0,34 | -9,27 | | | 277 | 0,78 | |
| Kiht 3 | EPS 60 Silver | 0,245 | 30 | 7,35 | 0,032 | 7,66 | 75,0 | 22,50 | 13,22 | | temp kihtide vahel | | 1521 | 8,13 |
| Kiht 4 | OSB plaat (650), kuiv | 0,015 | 50 | 0,75 | 0,13 | 0,12 | 1,1 | 0,34 | 13,56 | | | | 1555 | 8,88 |
| Kiht 5 | Aurutõkke kile | 0,00015 | 53333 | 8,00 | 0,15 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 13,56 | | | | 1555 | 16,88 |
| Kiht 6 | Õhkvahe ventileerimata | 0,050 | 1 | 0,05 | 0,025 | 2,00 | 19,6 | 5,88 | 19,44 | | | | 2259 | 16,93 |
| Kiht 7 | Kipsplaat, kuiv | 0,015 | 10 | 0,15 | 0,25 | 0,06 | 0,6 | 0,18 | 19,62 | | | 2284 | 17,08 | |
| Sisepind | | | 0 | 0 | | 0,13 | 1,3 | 0,38 | 20,00 | | sisepind | 1169 | 2338 | |
| | | | ΣS _d , m | 17,08 | ΣR, m²K/W | 10,21 | 100 | siseõhk | | | | | | |
| | | | | | U, W/(m²K) | 0,10 | | | | | | | | |

Veeauru osarõhud sees ja väljas, Pa

| | |
|-------------------------|--------|
| | Sees |
| Veeauru max osarõhk | 2338,2 |
| Suhteline õhuniiskus | 50,0 |
| Tegelik veeauru osarõhk | 1169,1 |

| | |
|--------|----------|
| Väljas | Erinevus |
| 259,9 | |
| 80,0 | |
| 207,9 | 961,2 |



Joonis 32: SIP-seina kondenseerumise graafik

LISA 4.2. SIP katusekonstruktsioon: Katuseplekk 0,5mm, aluslaudis 32x100mm, distantssliist 22x50 /õhkvahe, niiskustõkke kile, OSB 15 mm, EPS 60 Silver 400mm (STEICOjoist SJ90 talade vahel, s. 1250 mm), OSB 15 mm, õhkvahe 50 mm, tulekindel kipsplaat GKF 15mm.

Kondenseerumine

Kliimatingimused: sees 20°C ja $\text{RH} = 50\% \rightarrow p_i = 0,5 \cdot 2337 = 1169 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ väljas
 -10°C ja $\text{RH} = 80\% \rightarrow p_a = 0,8 \cdot 259,7 = 207,76 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

kondenseerumisperiood 90 päeva = 2160 h

Vastavalt arvutustabelile 37 ja joonisele 33 SIP katusekonstruktsioonis
kondensatsioonivett ei teki.

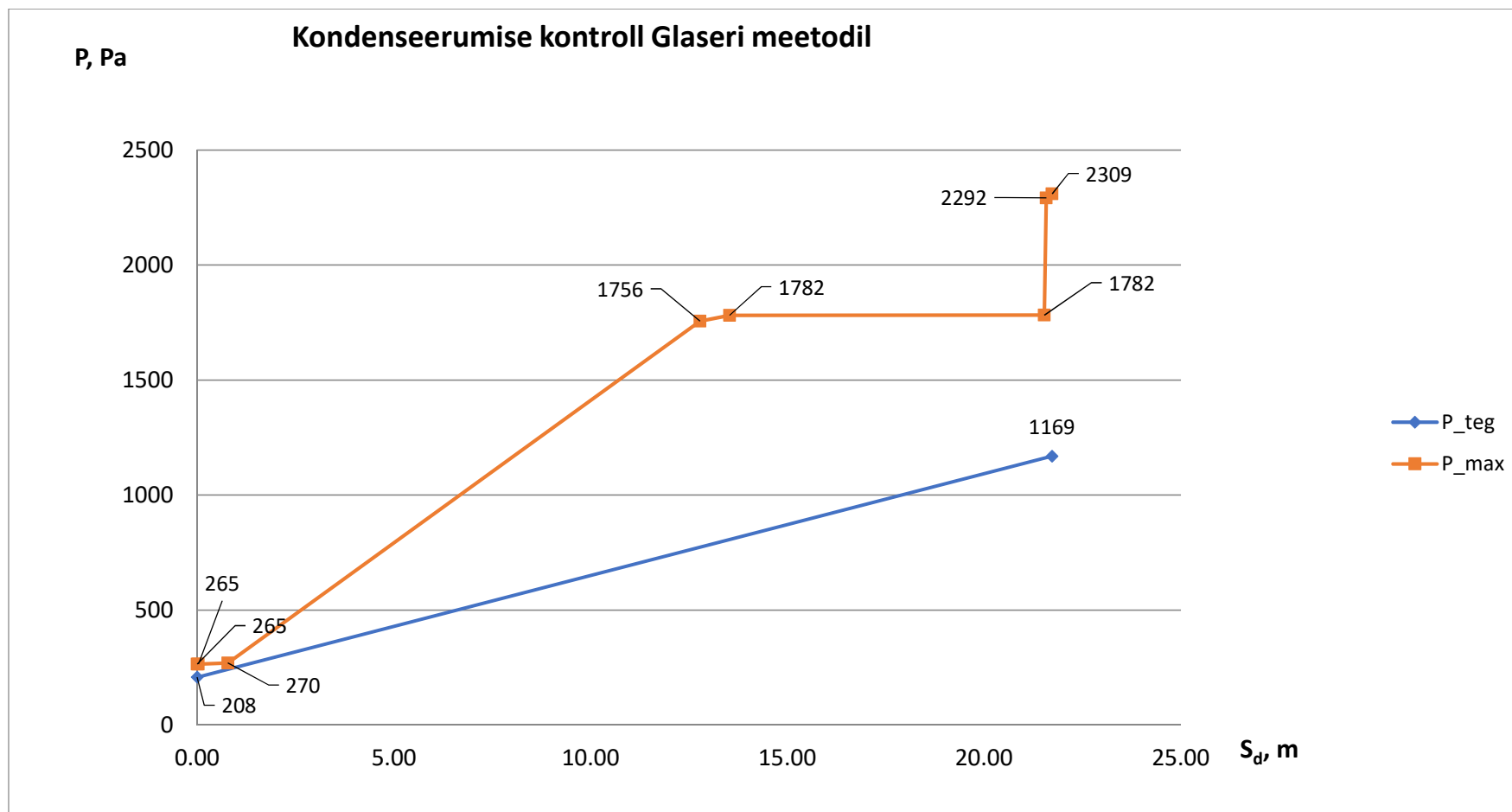
Tabel 37: SIP katusekonstruktsiooni kondenseerumisriski arvutus

| Tarindi osa | Materjal (tihedus kg/m ³) | Kihi paksus d, m | μ | S_d | λ , W/(mK) | R , m ² K/W | %R | Välis-temp. | Sise-temp. | Δt | -10 | P_{teg} (Pa) | P_{max} (Pa) | S_d , summa |
|-------------|--|------------------|-------|-------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------|------------|------------|-----|-------------------|-------------------|------------------|
| | | | | | | | | -10° C | 20° C | | | | | |
| Välispind | tuulutusvahega | | | | | 0,10 | 0,7 | 0,20 | -9,80 | | | 208 | 265 | 0,00 |
| Kiht 1 | Niiskustõkke kile | 0,00022 | 136 | 0,03 | 0,15 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | -9,80 | | | | 265 | 0,03 |
| Kiht 2 | OSB plaat (650), kuiv | 0,015 | 50 | 0,75 | 0,13 | 0,12 | 0,8 | 0,23 | -9,57 | | | | 270 | 0,78 |
| Kiht 3 | EPS 60 Silver | 0,400 | 30 | 12,00 | 0,032 | 12,50 | 83,4 | 25,01 | 15,45 | | | | 1756 | 12,78 |
| Kiht 4 | OSB plaat (650), kuiv | 0,015 | 50 | 0,75 | 0,13 | 0,12 | 0,8 | 0,23 | 15,68 | | | | 1782 | 13,53 |
| Kiht 5 | Aurutõkke kile | 0,00015 | 53333 | 8,00 | 0,15 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 15,68 | | | | 1782 | 21,53 |
| Kiht 6 | Õhkvahe ventileerimata | 0,050 | 1 | 0,05 | 0,025 | 2,00 | 13,3 | 4,00 | 19,68 | | | | 2292 | 21,58 |
| Kiht 7 | Kipsplaat, kuiv | 0,015 | 10 | 0,15 | 0,25 | 0,06 | 0,4 | 0,12 | 19,80 | | | | 2309 | 21,73 |
| Sisepind | | | 0 | 0 | | 0,10 | 0,7 | 0,20 | 20,00 | | | 1169 | 2338 | |
| | | | | | ΣS_d , m | 21,73 | ΣR , m ² K/W | 14,99 | 100 | | | | | |
| | | | | | | | U, W/(m ² K) | 0,07 | | | | | | |

Veeauru osarõhud sees ja väljas, Pa

| | Sees |
|-------------------------|--------|
| Veeauru max osarõhk | 2338,2 |
| Suhteline õhuniiskus | 50,0 |
| Tegelik veeauru osarõhk | 1169,1 |

| Väljas | Erinevus |
|--------|----------|
| 259,9 | |
| 80,0 | |
| 207,9 | 961,2 |



Joonis 33: SIP katusekonstruktsiooni kondenseerumisgraafik

LISA 4.3. Puit välissein: Laudis 21mm, distanttsliist 22x50/õhkvahe, tuuletõkkeplaat Isoplaat 12 mm, mineraalvill Knauf Naturboard 032 200 mm (50x200 mm puitkarkassi vahel, s. 600mm), aurutõkkekile 0,15 mm, mineraalvill Knauf Naturboard 032 50 mm (50x50 mm horisontaalse puitroovi vahel, s. 600 mm), kipsplaat GKB 12,5mm.

Kondenseerumine

Kliimatingimused: sees 20°C ja RH = 50% → $p_i = 0,5 \cdot 2337 = 1169 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

väljas -10°C ja RH = 80% → $p_a = 0,8 \cdot 259,7 = 207,76 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

kondenseerumisperiood 90 päeva = 2160 h

Vastavalt arvutustabelile 38 ja joonisele 34 puitkarkasshoone välisseinas kondensatsioonivett ei teki.

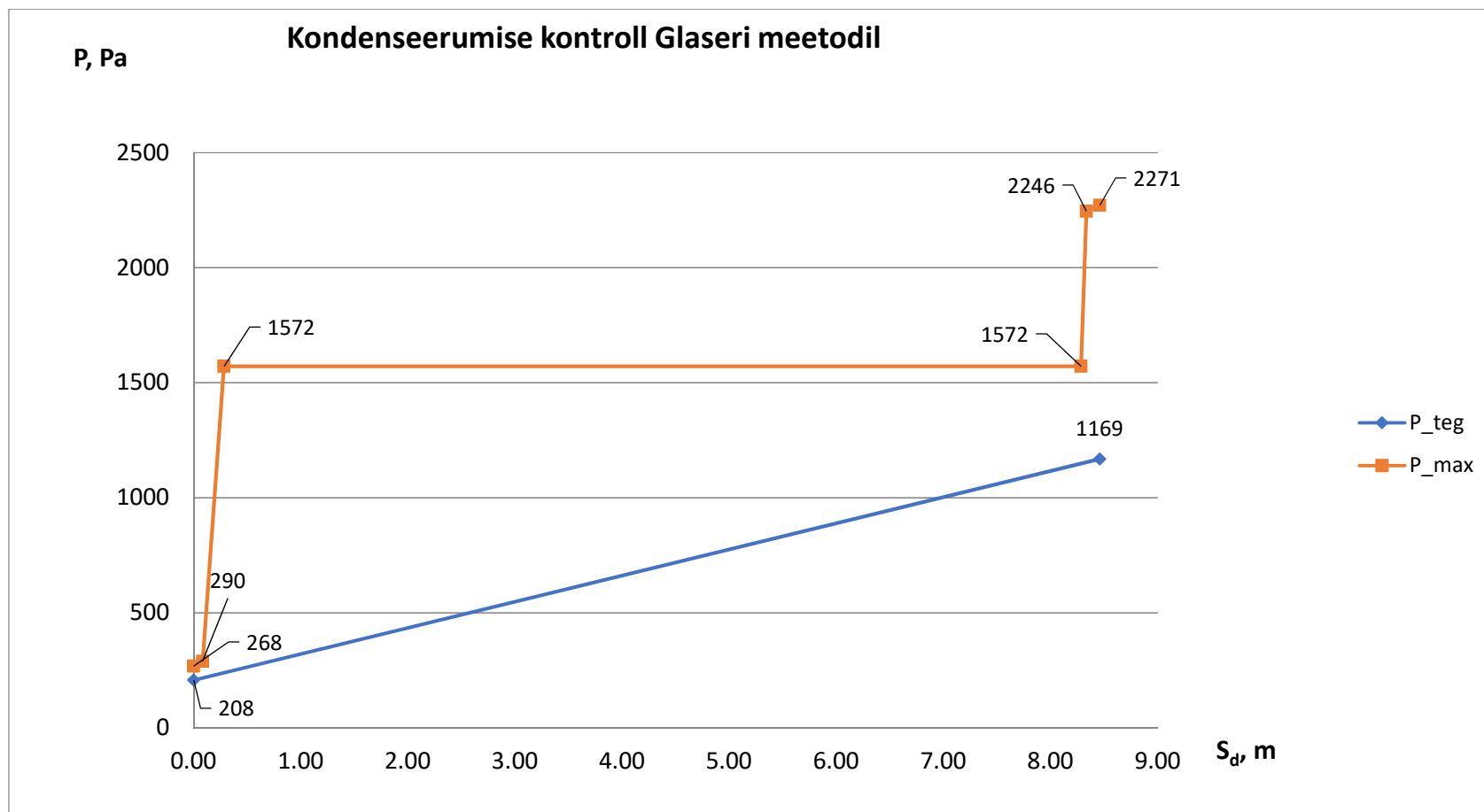
Tabel 38: Puitkarkasshoone välisseina kondensatsiooniriski arvutus

| | | | | | | | | Välis-temp. | Sise-temp. | | | | | |
|-------------|-----------------------------|------------------|---------------------|----------------|--------------|-------------|------|-------------|------------|----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------|
| | | | | | | | | -10° C | 20° C | | | | | |
| Tarindi osa | Materjal (tihedus kg/m³) | Kihi paksus d, m | μ | S _d | λ, W/(mK) | R, m²K/W | %R | Δt | -10 | välisõhk | P _{teg} (Pa) | P _{max} (Pa) | S _d , summa | |
| Välispind | tuulutusvahega | | | | | 0,1 | 1,2 | 0,36 | -9,64 | | | 208 | 260 | 0,00 |
| Kiht 1 | Isoplaat | 0,01200 | 7 | 0,08 | 0,049 | 0,24 | 2,9 | 0,88 | -8,76 | | | | 290 | 0,08 |
| Kiht 2 | Knauf Naturboard 032 | 0,20000 | 1 | 0,20 | 0,032 | 6,25 | 75,0 | 22,49 | 13,73 | | temp kihtide | | 1572 | 0,28 |
| Kiht 3 | Aurutõkke kile | 0,00015 | 53333 | 8,00 | 0,15 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 13,73 | | | | 1572 | 8,28 |
| Kiht 4 | Knauf Naturboard 032 | 0,05000 | 1 | 0,05 | 0,032 | 1,56 | 18,7 | 5,62 | 19,35 | | | | 2246 | 8,33 |
| Kiht 7 | Kipsplaat, kuiv | 0,01250 | 10 | 0,13 | 0,25 | 0,05 | 0,6 | 0,18 | 19,53 | | | | 2271 | 8,46 |
| Sisepind | | | 0 | 0 | | 0,13 | 1,6 | 0,47 | 20,00 | sisepind | 1169 | 2338 | | |
| | | | ΣS _d , m | 8,46 | ΣR, m²K/W | 8,34 | 100 | siseõhk | | | | | | |
| | | | | | U, W/(m²K) | 0,12 | | | | | | | | |

Veeauru osarõhud sees ja väljas, Pa

| | Sees |
|-------------------------|--------|
| Veeauru max osarõhk | 2338,2 |
| Suhteline õhuniiskus | 50,0 |
| Tegelik veeauru osarõhk | 1169,1 |

| Väljas | Erinevus |
|--------|----------|
| 259,9 | |
| 80,0 | |
| 207,9 | 961,2 |



Joonis 34: Puitkarkasshoone välisseina kondenseerumisgraafik

LISA 4.4. Puit katusekonstruktsioon: Katuseplekk 0,5 mm, aluslaudis 32x100 mm, niiskustõkke kile, tuuletõkkeplaat Isoplaat 12 (puittalade vahel), mineraalvill Knauf Naturboard 032 350 mm (50x400 puittalade vahel, s. 600mm), aurutõkkekile 0,15 mm, mineraalvill Knauf Naturboard 032 50 mm (50x50 mm horisontaalse puitroovi vahel, s. 400 mm), kipsplaat GKB 12,5mm.

Kondenseerumine

Kliimatingimused: sees 20°C ja RH = 50% → $p_i = 0,5 \cdot 2337 = 1169 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

väljas -10°C ja RH = 80% → $p_a = 0,8 \cdot 259,7 = 207,76 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

kondenseerumisperiood 90 päeva = 2160 h

Vastavalt arvutustabelile 39 ja joonisele 35 puitkarkasshoone katusekonstruktsioonis kondensatsioonivett ei teki.

Tabel 39: Puitkarkasshoone katusekonstruktsiooni kondensatsiooniriski arvutamine

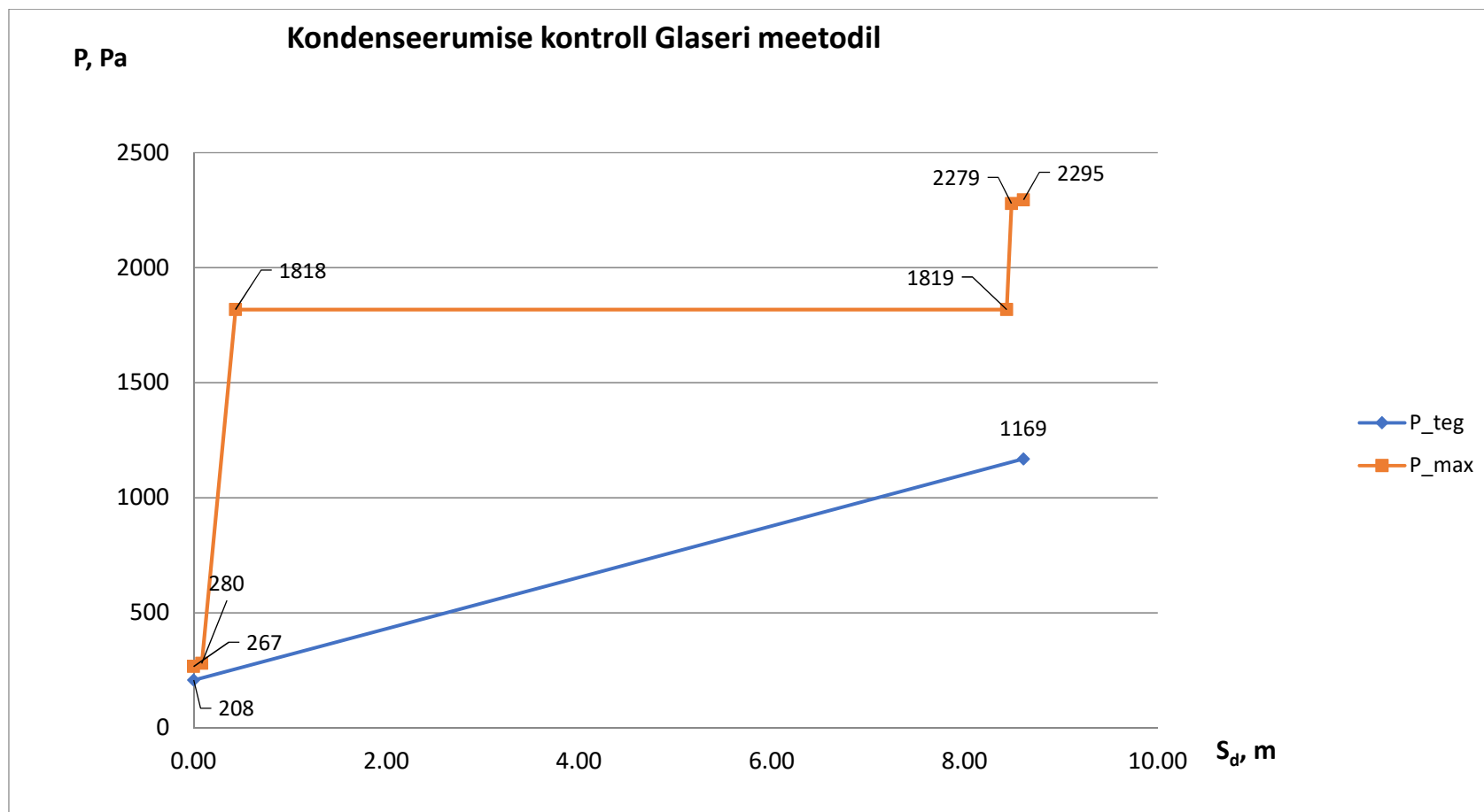
| | | | | | | | | Välis-temp. | Sise-temp. | | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|----------------|--------------|-------------|------|-------------|------------|----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------|
| | | | | | | | | -10° C | 20° C | | | | | |
| Tarindi osa | Materjal (tihedus kg/m³) | Kihi paksus d, m | μ | S _d | λ, W/(mK) | R, m²K/W | %R | Δt | -10 | välisõhk | P _{teg} (Pa) | P _{max} (Pa) | S _d , summa | |
| Välispind | tuulutusvahega | | | | | 0,13 | 1,0 | 0,30 | -9,70 | | 208 | 267 | 0,00 | |
| Kiht 1 | Isoplaat | 0,01200 | 7 | 0,08 | 0,049 | 0,24 | 1,9 | 0,56 | -9,14 | | | 280 | 0,08 | |
| Kiht 2 | Knauf Naturboard 032 | 0,35000 | 1 | 0,35 | 0,032 | 10,94 | 83,8 | 25,13 | 15,99 | | | 1818 | 0,43 | |
| Kiht 3 | Aurutõkke kile | 0,00015 | 53333 | 8,00 | 0,15 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 16,00 | | temp kihtide | | 1819 | 8,43 |
| Kiht 4 | Knauf Naturboard 032 | 0,05000 | 1 | 0,05 | 0,032 | 1,56 | 12,0 | 3,59 | 19,59 | | | | 2279 | 8,48 |
| Kiht 7 | Kipsplaat, kuiv | 0,01250 | 10 | 0,13 | 0,25 | 0,05 | 0,4 | 0,11 | 19,70 | | | | 2295 | 8,61 |
| Sisepind | | | 0 | | | 0,13 | 1,0 | 0,30 | 20,00 | | sisepind | 1169 | 2338 | |
| | | | ΣS _d , m | 8,61 | ΣR, m²K/W | 13,06 | 100 | siseõhk | | | | | | |
| | | | | | U, W/(m²K) | 0,08 | | | | | | | | |

Veeauru osarõhud sees ja väljas, Pa

| | Sees |
|-------------------------|--------|
| Veeauru max osarõhk | 2338,2 |
| Suhteline õhuniiskus | 50,0 |
| Tegelik veeauru osarõhk | 1169,1 |

| Väljas | Erinevus |
|--------|----------|
| 259,9 | |
| 80,0 | |
| 207,9 | 961,2 |

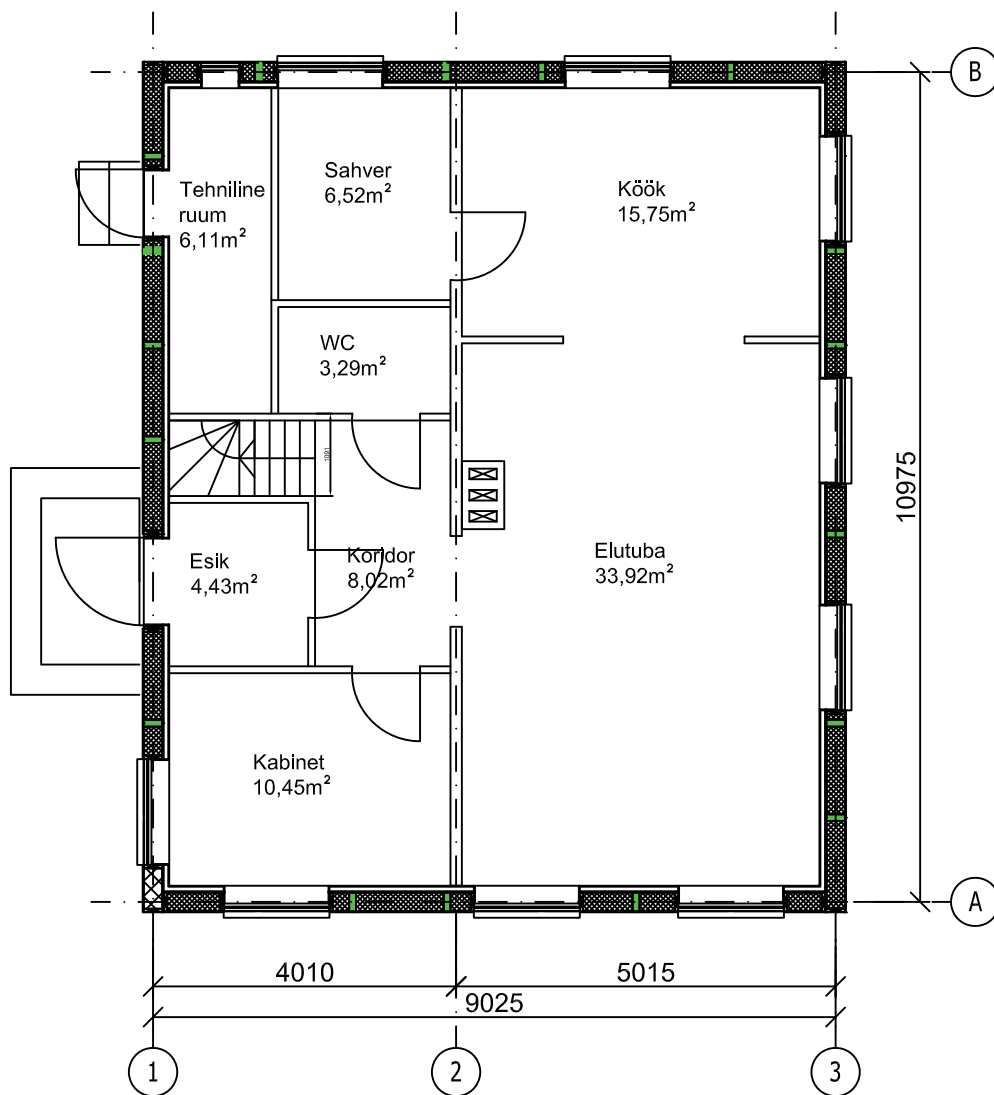
s




Joonis 35: Puitkarkasshoone katusekonstruktsiooni kondenseerumisgraafik

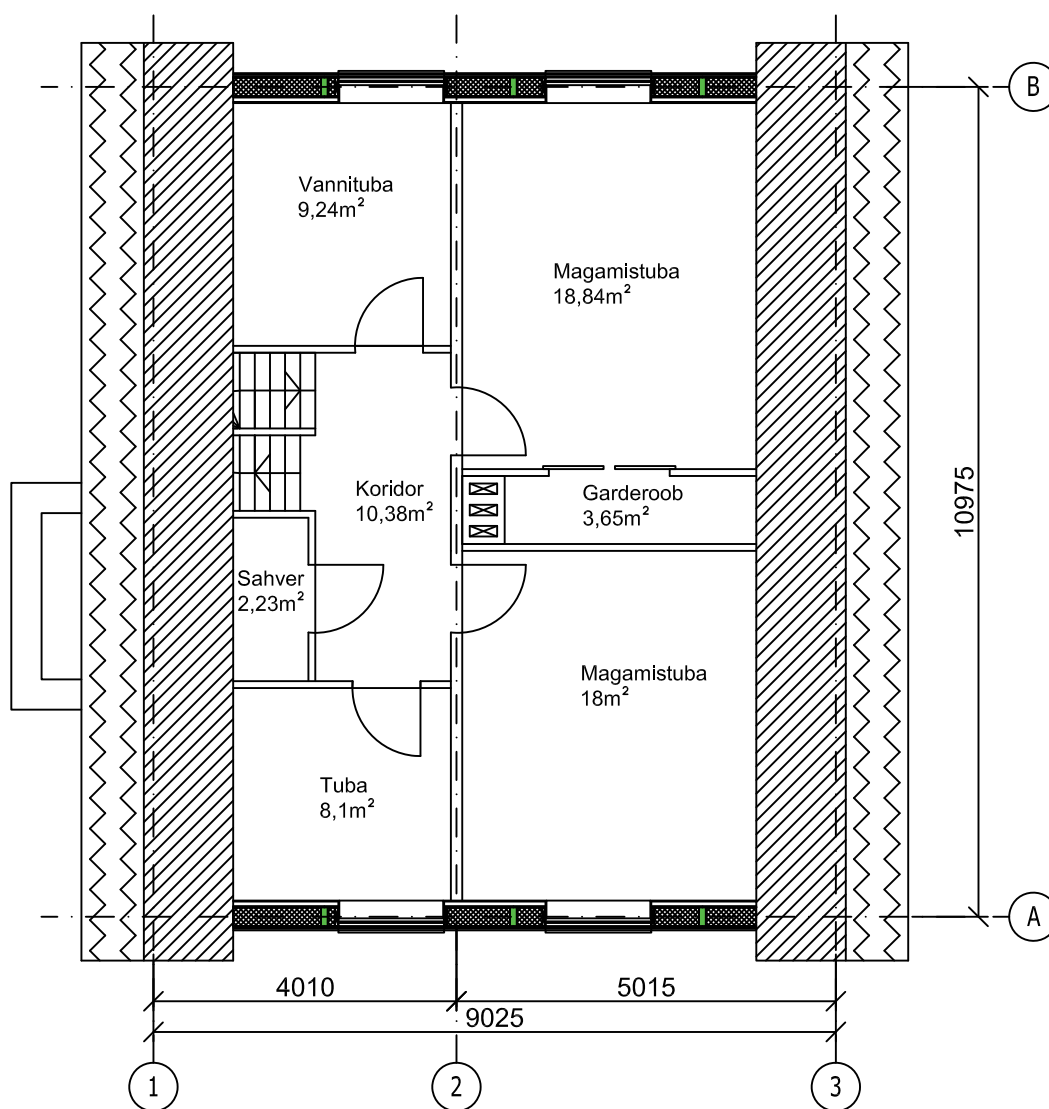
Lisa 5: Võrdlushoone plaanid ja vaated

I-korruse plaan



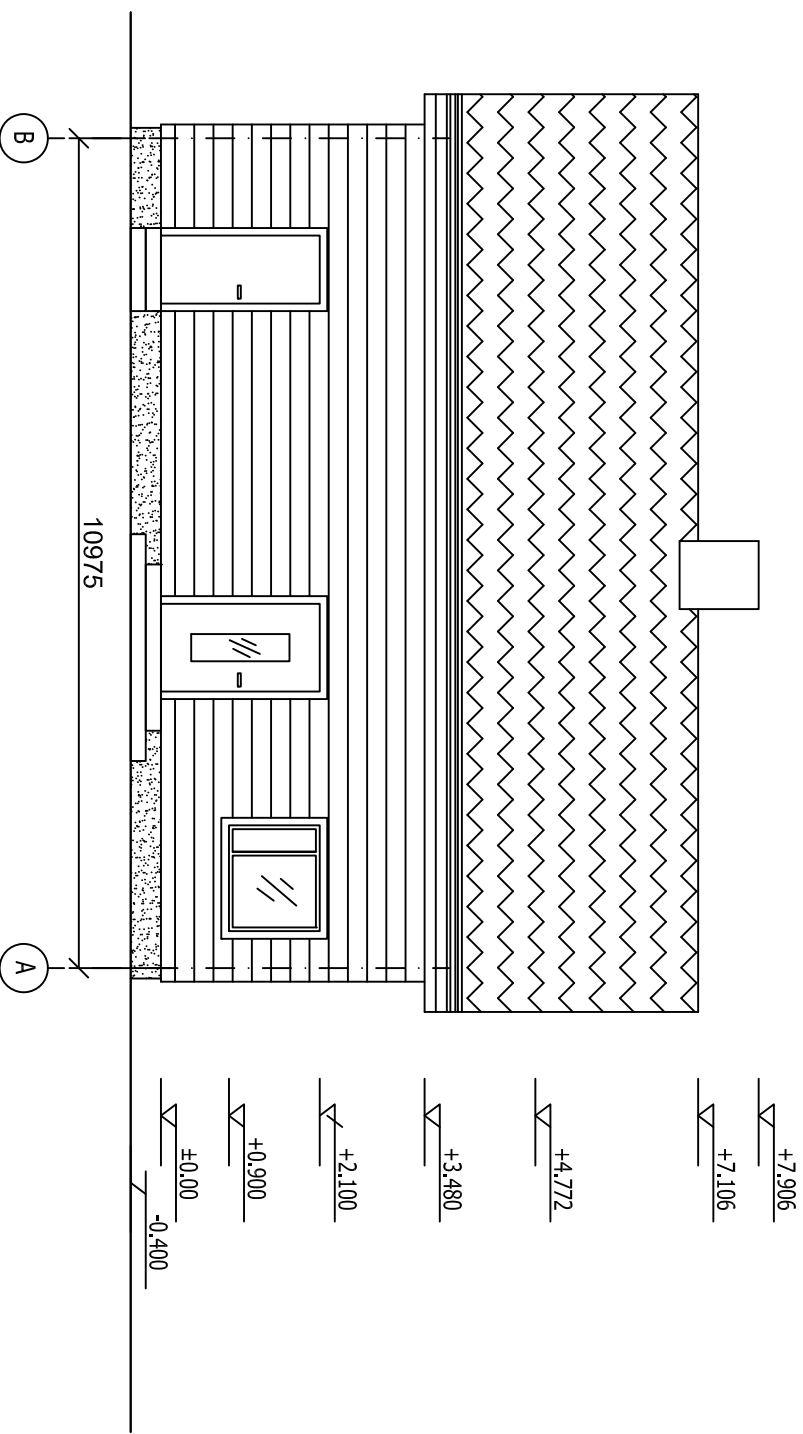
| | | | | | |
|---|---------------------------|--|--------------------------------------|--|--|
| Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu | | | Projekti nimetus: Magistritöö | | Projekti nr: Mag-18 |
| Objekti aadress: | | | | | Staadium: Põhiprojekt |
| Projekteeris | Hindrek Hirschon | | 09.01.2018 | Objekti nimetus: Võrdlushoone projekt | Osa: Arhitektuurne |
| Kontrollis | Martti-Jaan Miljan | | | | Alajaotus: |
|  Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences  Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering | | | | Möötkava: 1:100 | Joonise nimetus: Joonis 36: I-korruse plaan |
| | | | | Lehti: 5 | Leht: VP-Ik |
| | | | | Form: A4 | Fail: Võrdlushoone.dwg |


II-korruse plaan



| | | | | | |
|---|---------------------------|--|--------------------------------------|--|--|
| Tellija: Eesti Maaülikool, Kreutzwaldi 1, Tartu | | | Projekti nimetus: Magistritöö | | Projekti nr: Mag-18 |
| Objekti aadress: | | | | | Staadium: Põhiprojekt |
| Projekteeris | Hindrek Hirschon | | 09.01.2018 | Objekti nimetus: Võrdlushoone projekt | Osa: Arhitektuurne |
| Kontrollis | Martti-Jaan Miljan | | | | Alajaotus: |
|  Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences  Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering | | | | Möötkava: 1:100 | Joonise nimetus: |
| | | | | Lehti: 5 | Leht: VP-IIk |
| | | | | Form: A4 | Fail: Võrdlushoone.dwg |
| | | | | | Joonis 37: II-korruse plaan |

Vaade läänest

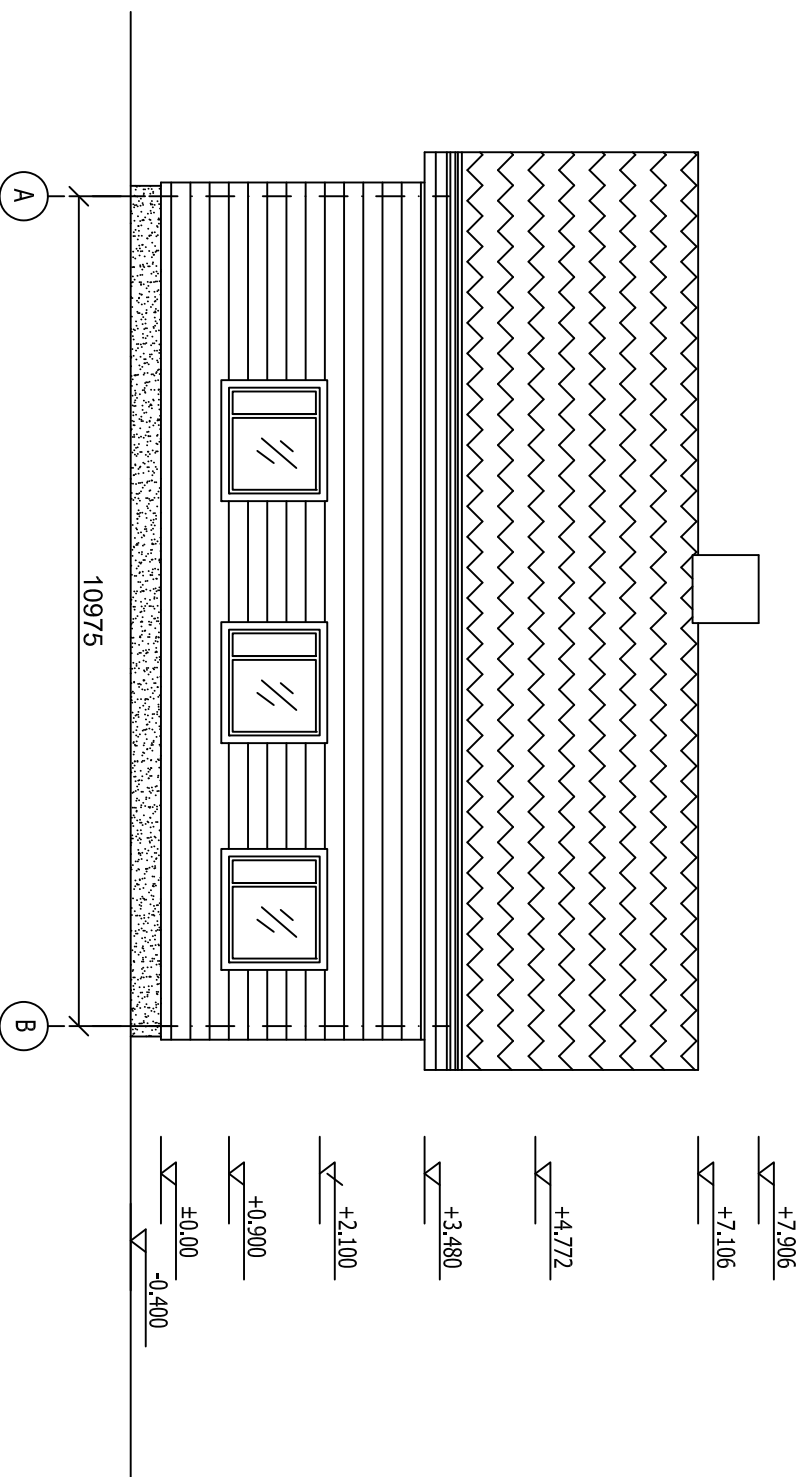



| | | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|
| Tellijä: Eesti Maailikool, Kreutzwaldi 1, Tartu | | Projekti nimetus: | | Projekti nr: Mag-18 | | |
| Objekti aadress: | | Magistritöö | | Staadium: Põhiprojekt | | |
| Projekteeris | Hindrek Hirschon | | | Osa: Arhitektuurne | | |
| Kontrollis | Martti-Jaan Miljan | 09.01.2018 | Objekti nimetus: | Alajaos: | | |
| | | | Võrdlushoone projekt | | | |
|  Eesti Maailikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering Maehituse osakond Rural department | | | | Mööðkava: | 1:100 | |
| | | | Lehti: | 5 | Leht: | VP-VL |
| | | | Form: | A4 | Fail: | Võrdlushoone.dwg |
| | | | Joonise nimetus: | | | Joonis 38: Vaade läänest |


Eesti Maailikool
 Estonian University of Life Sciences
 Metsandus- ja maaehitusinstituut
 Institute of Forestry and Rural Engineering

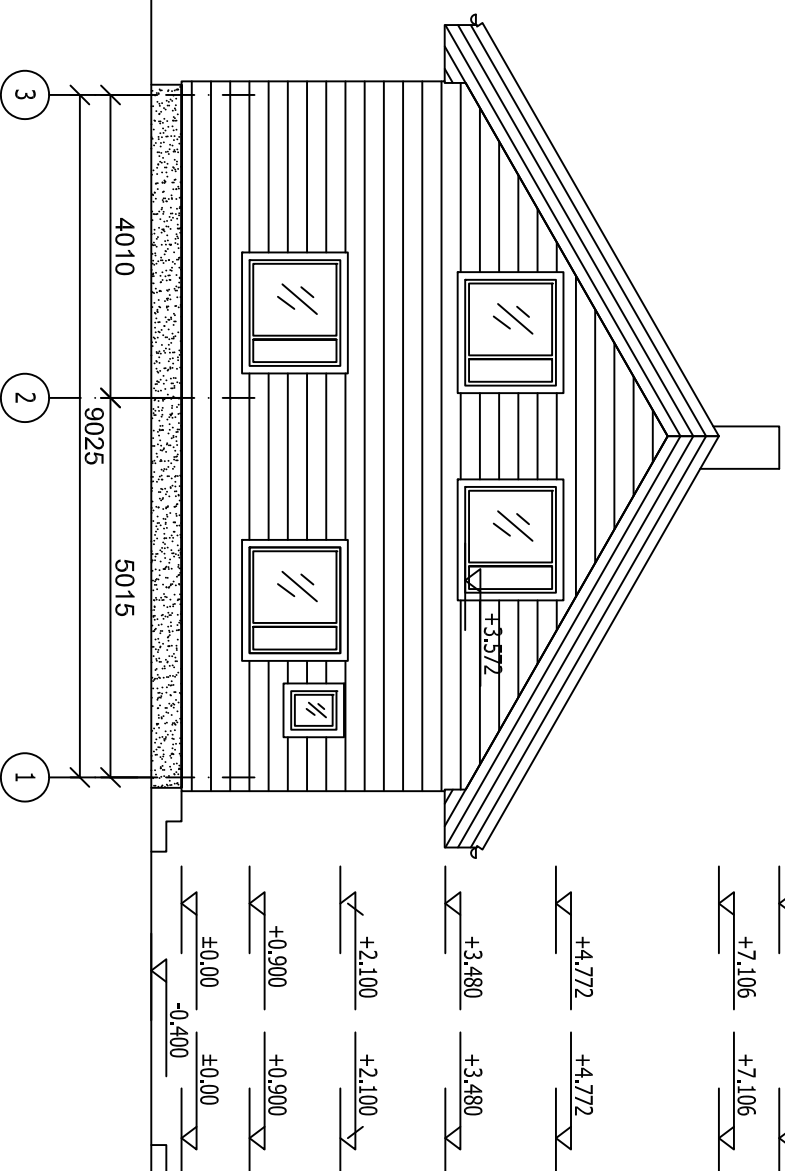

EMIL
 Maaehituse osakond
 Rural department

Vaade idast

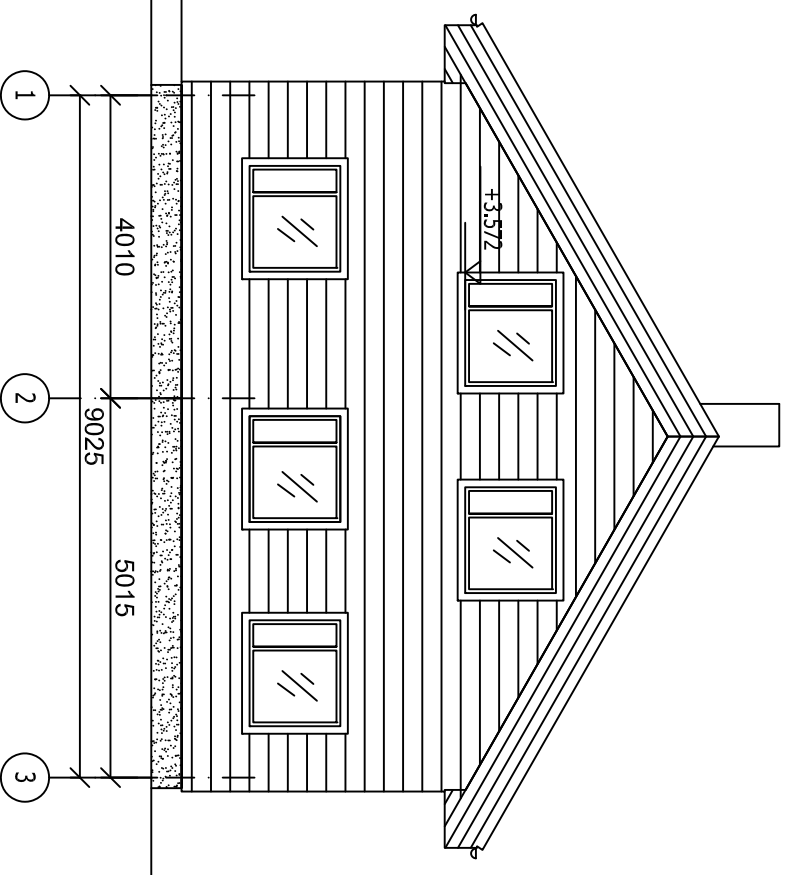



| | | | | | | |
|--|--------------------|-------------------|--|----------------------|---------------------------|------------------|
| Tellija: Eesti Maailikool, Kreuzwaldi 1, Tartu | | Projekti nimetus: | Magistri töö | | Projekti nr: | Mag-18 |
| Objekti aadress: | | | | | Staadium: | Põhiprojekt |
| Projekteeris | Hindrek Hirschon | 09.01.2018 | Objekti nimetus: | Võrdlushoone projekt | Osa: | Arhitektuurne |
| Kontrollis | Martti-Jaan Miljan | | <div> <div>  Eesti Maailikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusinstituut Institute of Forestry and Rural Engineering </div> <div> Maaehituse osakond Rural department </div> </div> | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | Lehti: | 5 | Lehti: | VP-VI |
| | | | Form: | A4 | Fail: | Võrdlushoone.dwg |
| | | | Möödkava: | 1:100 | Joonis 39: Vaade idast | |
| | | | Joonise nimetus: | | | |

Vaade põhjast



Vaade lõunast



| | | | | | |
|---|--------------------|-------------------|----------------------|------------------|---------------|
| Telli/a: | | Projekti nimetus: | | Projekti nr: | |
| Eesti Maailikool, Kreuzwaldi 1, Tartu | | Magistritöö | | Mag-18 | |
| Objekti aadress: | | | | Saadum: | |
| | | | | Põhiprojekt | |
| Projekteeris | Hindrek Hirschon | 09.01.2018 | Objekti nimetus: | Osa: | |
| Kontrollis | Martti-Jaan Miljan | | Võrdlushoone projekt | Arhitektuurne | |
| <div>Eesti Maailikool Estonian University of Life Sciences Metsandus- ja maaehitusteaduste osakond Institute of Forestry and Rural Engineering Rural department</div> | | | Mõõtkava: | Joonise nimetus: | |
| | | | Lehti: | Leht: | Joonis 40: |
| | | | 5 | VP-PV, VL | Vaade põhjast |
| | | Form: | A4 | Fail: | Vaade lõunast |
| | | | | Võrdlushoone.dwg | |

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Hindrek Hirschon,

(sünnipäev 10.02.1986)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
Konstruktiivsetest soojusisolatsioonipaneelidest (SIP-paneelid) väikeelamu piirdetarindite
soojustehniline analüüs ja tulemuste võrdlus puitkarkasshoonega,
mille juhendaja on Martti-Jaan Miljan,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, *Kuupäeva sisestamiseks klõpsake siin.*

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)